



**Loubna Kerfah**

Licenciada em Engenharia Geológica

## **Reabilitação de taludes de escavação rochosos em ferrovias**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Geológica

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Doutora Paula F. da Silva, Prof.<sup>a</sup> Auxiliar,  
GeoBioTec e DCT, FCT NOVA

Co-orientador: Mestre Eng.<sup>o</sup> Nelson Rodrigues, Chefe do  
Núcleo de Geologia e Geotecnia Ambiental TPF Planege Cenor

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof. Auxiliar - FCT/UNL

Arguente: Mestre Carlos José de Oliveira Baião, Serviço de Geologia e  
Geotecnia, TPF Planege Cenor

Vogal: Doutora Paula Fernandes da Silva, Prof. Auxiliar – FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2017**

Reabilitação de taludes de escavação rochosos em ferrovias

**Copyright@** Loubna Kerfah, 2017

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que contribuíram de alguma forma para a conclusão desta jornada. Uma jornada com momentos bons e maus, com experiências negativas e positivas, mas que apesar de tudo, foi uma jornada de aprendizagem, de crescimento e da realização de um grande objetivo pessoal. De vós guardo só o melhor, um enorme obrigado:

- À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por me ter aberto as portas para o futuro;
- Aos professores e colaboradores do Departamento de Ciências da Terra, por me terem acolhido e apoiado ao longo deste percurso académico;
- À TPF Planege Cenor, por me ter sugerido o caso de estudo para a presente dissertação e se disponibilizar sempre que necessário;
- À minha professora, orientadora e amiga, Professora Paula Silva, por todo o apoio, disponibilidade, orientação e por ter sido tão acessível, não só na realização desta dissertação, bem como ao longo de todas as unidades curriculares em que nos cruzámos;
- À minha família e amigos, por toda a ajuda, paciência e compreensão nas piores alturas e por estarem presentes nas melhores fases. Sem eles esta etapa jamais teria sido igual ou possível.



## Resumo

As ferrovias representam uma das principais vias de comunicação de um país, possibilitando a ligação de diversos locais por meio terrestre, com o intuito de transportar cargas ou passageiros de modo económico. Por este motivo, é essencial garantir a sua preservação e o seu funcionamento adequado durante o respetivo tempo de vida útil.

Ao longo destas infraestruturas viárias é possível identificar taludes de escavação na sua envolvente que, frequentemente, se encontram instabilizados, por diferentes tipos de movimentos de massa. Por essa razão, existem diversos sistemas de classificação que pretendem avaliar a necessidade de intervenção, em infraestruturas lineares, e priorizar a intervenção nos taludes de maior risco.

Na presente dissertação, inventariaram-se os taludes de escavação rochosos de uma linha ferroviária com a finalidade de identificar aqueles que representassem risco para priorizar a sua reabilitação. Através de métodos expeditos realizou-se a caracterização geológica e geotécnica dos taludes, procedendo-se à descrição dos sistemas de descontinuidades e mecanismos de rotura existentes, bem como a caracterização das valas de captação e dos sistemas de drenagem associados.

Os taludes passam por uma primeira análise, em função da respetiva geometria e do ábaco de Ritchie, que permite identificar aqueles que não apresentam risco significativo e, portanto, não justificam a sua reabilitação. Aqueles que são identificados como perigosos, foi-lhes aplicado o sistema de classificação e gestão do risco para rodovias, *Unstable Slope Management System* (USMS), desenvolvido pelo Departamento dos Transportes do estado de Washington (WSDOT). Após as devidas adaptações deste sistema para aplicação em ferrovias, avaliam-se os parâmetros inerentes ao talude e à ferrovia, determinando-se, assim, se o talude necessita, ou não, de intervenção. Para os taludes que necessitem de ser intervencionados são sugeridas algumas soluções de reabilitação, tendo por base o *Slope Mass Rating* (SMR). Finalmente, tecem-se considerações sobre a eficácia da metodologia adotada.

**Palavras-chave:** Ferrovias, Taludes de escavação rochosos, Instabilização, Reabilitação



## **Abstract**

Railways are one of the main types of transportation allowing the connection between different places, by ground, with the main goal of carrying goods and passengers economically. Therefore, railways' preservation is indispensable to guarantee its proper functioning, over its lifespan.

Along these infrastructures, it is possible to identify cut slopes next to it which, frequently, are unstable due to different types of mass movements. As so, there are various classification systems intending to access the need of intervention, in linear infrastructures, and prioritize it for the slopes at higher risk.

In this dissertation, rock mass cut slopes of a railway were studied aiming to identify the ones presenting higher risk, to prioritize their rehabilitation. Using expeditious methods, a geologic and geotechnical characterization of those slopes was made, as well as the description of discontinuity systems and instability mechanisms, as well as the characterization of their ditches and present drainage systems conditions.

Those cut slopes are firstly analyzed according to their geometric features and Ritchie's abacus situation, allowing to identify the ones that do not present significant hazard and, therefore, do not need to be rehabilitated. To the cut slopes classified as dangerous, it is then applied the highways' classification and risk management's system Unstable Slope Management System (USMS), developed by Washington State Department of Transportation (WSDOT). After the necessary modifications to the system so that it can be applied to railways, the parameters inherent to cut slopes and railways are assessed and it is determined if the slope need to be intervened. For the ones which need to be rehabilitated, some rehabilitation measures are suggested, based on Slope Mass Rating (SMR) system. Finally, some considerations are made on the efficiency of the adopted methodology.

**Keywords:** Railways, Cut slopes, Instabilization, Rehabilitation





# Índice de matérias

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>I</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>V</b>
<b>Índice de matérias .....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de tabelas .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abreviaturas, siglas e símbolos .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e objetivos.....	1
1.2 Organização da dissertação .....	4
<b>2. Taludes rochosos em ferrovias.....</b>	<b>7</b>
2.1 Generalidades.....	7
2.2 Movimentos de massa típicos em taludes rochosos.....	8
2.3 Caracterização de taludes de escavação .....	14
2.3.1 Parâmetros descritivos .....	14
2.3.2 Avaliação e gestão do risco em taludes.....	18
2.4 Medidas de mitigação em taludes rochosos .....	42
2.4.1 Reperfilamento .....	42
2.4.2 Reforço .....	43
2.4.3 Proteção .....	44
2.4.4 Drenagem .....	45
2.4.5 Geossintéticos .....	47
<b>3. Estudo de caso – Trecho ferroviário Guarda-Vilar Formoso .....</b>	<b>49</b>
3.1 Enquadramento geográfico.....	49
3.2 Enquadramento geológico e geotectónico .....	50
3.2.1 Geral .....	50
3.2.2 Geologia da zona de estudo .....	52
3.2.3 Hidrogeologia da zona de estudo .....	55
3.3 Caracterização da ferrovia .....	56
3.4 Caraterização dos taludes de escavação .....	58
3.4.1 Metodologia de trabalho.....	58
3.4.2 Reconhecimento de campo .....	60
<b>4. Avaliação do risco .....</b>	<b>69</b>
4.1 Dimensionamento das valas de captação - ábaco de Ritchie.....	69
4.2 Aplicação do USMS.....	71
4.2.1 Soluções de estabilização .....	88
4.2.2 Discussão das soluções de estabilização sugeridas .....	93

<b>5. Considerações finais e trabalhos futuros .....</b>	<b>97</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>101</b>

## **ANEXOS**

*ANEXO A - Parâmetros de caracterização dos sistemas de descontinuidades segundo ISRM, 1978*

*ANEXO B - Tabelas para obtenção do  $RMR_{básico}$  e SMR*

*ANEXO C - Descrição dos critérios do Rockfall Hazard Rating System – RHRS (Oregon)*

*ANEXO D - RHRS – Adaptações*

## **APÊNDICES**

*APÊNDICE I: Ficha de campo para caracterização de acidentes e incidentes em taludes rodo e ferroviários*

*APÊNDICE II: Caracterização dos taludes de escavação do trecho Guarda-Vilar Formoso*

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Taludes de escavação rochosos em vias-férreas .....	2
Figura 1.2 – Blocos junto à ferrovia .....	2
Figura 2.1 – Ábaco de Ritchie utilizado no dimensionamento das valas de captação .....	14
Figura 2.2 – Gráfico de correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades .....	17
Figura 2.3 – Exemplo de um diagrama Consequência vs. Risco para taludes com diferentes níveis de perigo .....	34
Figura 2.4 - Diagrama representativo das etapas a adotar pelo sistema sugerido pelo OHDOT .....	35
Figura 2.5 - Gráfico para determinação da classe de perigosidade em função do ângulo do talude e o $RHRON_{básico}$ .....	38
Figura 3.1 – Trecho de via estudado entre Guarda-Vilar Formoso .....	49
Figura 3.2 - Unidades tectono-estratigráficas do Maciço Hespérico .....	50
Figura 3.3 - Esquema geológico da distribuição dos granitos variscos na zona de estudo, extraído de Dias et al., 2013 .....	52
Figura 3.4 – Rede hidrográfica do Rio Côa .....	56
Figura 3.5 – Identificação das estações com via dupla no trecho estudado .....	58
Figura 3.6 – Registo de situações críticas observadas em campo .....	61
Figura 3.7 – Blocos soltos na vala de captação (esquerda) e na crista do talude (direita) .....	61
Figura 3.8 – Talude muito afastado da via (Pk 0+000) .....	62
Figura 3.9 – Granito de grão grosseiro (esquerda) e grão fino (direita) .....	62
Figura 3.10 – Afloramento de xistos ao Pk 9+432 .....	62
Figura 3.11 - Vista de um talude em maciço muito alterado (esquerda) e de um talude em maciço são (direita) .....	63
Figura 3.12 – Maciço com fraturas medianamente afastadas (esquerda) e afastadas(direita) .	63
Figura 3.13 – Representação das características das descontinuidades num maciço rochoso	64
Figura 3.14 – Representação das características das descontinuidades num maciço rochoso	64
Figura 3.15 - Mecanismos potenciais de rotura por tombamento (esquerda) e em queda (direita) .....	64
Figura 3.16 - Possível mecanismo de rotura em cunha .....	65

Figura 3.17 – Distância de captação considerada na análise de eficácia da vala .....	65
Figura 3.18 – Diagrama de Schmidt-Lambert – zonas de isodensidades dos pólos das descontinuidades .....	66
Figura 3.19 – Orientação média dos planos das principais famílias de descontinuidades .....	67
Figura 3.20 - Diagrama de roseta para as descontinuidades analisadas.....	67
Figura 4.1 – Talude em risco identificado ao Pk 4+360.....	75
Figura 4.2 - Talude em risco identificado ao Pk 7+470.....	76
Figura 4.3 - Talude em risco identificado ao Pk 12+760.....	77
Figura 4.4 - Talude em risco identificado ao Pk 15+150.....	78
Figura 4.5 - Talude em risco identificado ao Pk 16+110.....	79
Figura 4.6 - Talude em risco identificado ao Pk 16+340.....	80
Figura 4.7 - Talude em risco identificado ao Pk 16+740.....	81
Figura 4.8 - Talude em risco identificado ao Pk 17+400.....	82
Figura 4.9 - Talude em risco identificado ao Pk 18+080.....	83
Figura 4.10 - Talude em risco identificado ao Pk 20+155.....	84
Figura 4.11 - Talude em risco identificado ao Pk 20+360.....	85
Figura 4.12 - Talude em risco identificado ao Pk 20+960.....	86
Figura 4.13 - Talude em risco identificado ao Pk 23+330.....	87

## Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Metodologia de trabalho adotada.....	4
Tabela 2.1 - Adaptação da classificação de Varnes segundo Hungr et al., 2014 .....	9
Tabela 2.2 - Mecanismos de rotura frequentes em taludes rochosos .....	10
Tabela 2.3 - Termos descritivos da velocidade dos movimentos de massa g .....	13
Tabela 2.4 - Descrição do grau de alteração de um maciço rochoso.....	15
Tabela 2.5 – Descrição do grau de fraturação de um maciço rochoso .....	15
Tabela 2.6 – Tipos de descontinuidades .....	16
Tabela 2.7 – Descrição da qualidade da rocha segundo os diferentes intervalos de RQD .....	17
Tabela 2.8 - Medidas de estabilização de taludes sugeridas .....	18
Tabela 2.9 – Critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação da avaliação do risco .....	21
Tabela 2.10 - Fatores analisados para obtenção dos critérios envolvidos na fase preliminar (RHRS) .....	25
Tabela 2.11 - Sistema de classificação preliminar .....	26
Tabela 2.12 - Classes de priorização para taludes com evidências de movimentos anteriores	36
Tabela 2.13 - Classes de priorização de taludes sem evidências de movimentos anteriores ..	36
Tabela 2.14 - Nível de perigo para taludes em solo ou rocha .....	37
Tabela 2.15 – Nível de perigo para aterros.....	37
Tabela 2.16 - Fatores e parâmetros considerados na classificação SQI .....	39
Tabela 2.17 - Critérios de classificação adaptados no USMS .....	41
Tabela 2.18 – Técnicas de reperfilamento aplicáveis a taludes rochosos.....	43
Tabela 2.19 – Técnicas de reforço aplicadas em taludes rochosos .....	44
Tabela 2.20 – Técnicas de proteção aplicadas em taludes rochosos .....	45
Tabela 2.21 – Descrição e exemplificação do sistemas de drenagem profunda .....	46
Tabela 2.22– Descrição e exemplificação do sistemas de drenagem superficial .....	47
Tabela 2.23 – Descrição das funções dos diferentes geossintéticos .....	48
Tabela 3.1 - Classificação geocronológica dos granitos variscos .....	51

Tabela 3.2 – Direções da linha férrea nos diferentes Pks .....	57
Tabela 3.3 – Distância total entre estações de via dupla do trecho estudado .....	58
Tabela 3.4 - Resistência à compressão uniaxial estimada através da dureza ao ressaltado (martelo de Schmidt) .....	68
Tabela 4.1 – Taludes sem risco para a ferrovia.....	69
Tabela 4.2 – Pesos de cada critério considerados segundo o USMS.....	73
Tabela 4.3 - Pontuações USMS obtidas para taludes de risco .....	74
Tabela 4.4 - Taludes com soluções de reabilitação indevidamente aplicadas.....	88
Tabela 4.5 – Peso dos parâmetros utilizados no cálculo do $RMR_{básico}$ .....	90
Tabela 4.6 – Valores de SMR e medidas minimizadoras sugeridas .....	91
Tabela 4.7 – Taludes com vegetação na face ou na crista .....	93
Tabela 4.8 – Soluções de estabilização sugeridas para os taludes analisados.....	95

## Abreviaturas, siglas e símbolos

### a) Abreviaturas

**BGD** – Basic Geotechnical Description

**CRHRS** – Colorado Rockfall Hazard Rating System

**DOT** – Departamento dos transportes

**DP** – Distância de paragem

**DV** – Deslocamento do bloco até à base do talude

**DVD** – Distância de visibilidade Decisão

**DVD<sub>proj</sub>** – Distancia de Visibilidade Decisão de projeto

**DVD<sub>real</sub>** – Distância de Visibilidade Decisão real

**EQR** – Quantidade de blocos esperados na queda

**EUA** – Estados Unidos da América

**FEH** – Fator de exposição humana

**FG** – Fator geológico

**FHWA** – Federal Highway Administration

**FS** – Fator de secção

**GSI** – Geological Strength Index

**IMT** – Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P.

**IP** – Infraestruturas de Portugal

**ISRM** - International Society for Rock Mechanics

**LV** – Largura da vala

**MATD** – Média anual do tráfego diário

**MORH RS** – Missouri Rockfall Rating System

**mRHRS** – modified Rockfall Hazard Rating System

**MTO** – Ministério dos transportes de Ontário

**NYSDOT** – Departamento dos transportes do estado de Nova Iorque

**ODOT** – Departamento dos transportes de *Oregon*

**OHDOT** – Departamento dos transportes de *Ohio*

**op. cit.** – opus citatum

**Pk** – Perfil quilométrico

**P<sub>R</sub>V** – Largura real da vala

**PV** – Profundidade da vala

**RCU** – Resistência à compressão uniaxial

**RHRON** – Rockfall Hazard Rating System for Ontario

**RHRON<sub>básico</sub>** – RHRON básico

**RHRS** – Rockfall Hazard Rating System

**RHRSm2** – Rockfall Hazard Rating System modified 2

**RMR** - Rock Mass Rating

**RMR<sub>básico</sub>** – Rock Mass Rating básico

**RMV** – Risco médio para o veículo

**RQD** – Rock Quality Designation

**RR** – Risco Residual

**RRRSS** – Risk Reduction Rock Slope Scaling

**RTR** – Risco total relativo

**SMR** – Slope Mass Rating

**SQI** – Slope Quality Index

**TDOT** – Departamento dos transportes do *Tennessee*



**TMD** – Tráfego médio diário

**TMH** – Tráfego médio horário

**USMP** – Unstable Slope Management Program

**USMS** – Unstable Slope Management System

**V** – Velocidade de circulação

**VV** – Volume da vala

**WSDOT** – Departamento dos Transportes do estado de *Washington*

**ZAL** – Zona Astúrico Leonesa

**ZCI** – Zona Centro Ibérica

**ZGT** – Zona Galaico Transmontana

**ZSP** – Zona Sul Portuguesa

#### b) Símbolos:

Alfabeto latino

**a** – Formações aluvionares

**d** – Espaçamento entre descontinuidades medido em campo

**D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>** – Fases de deformação dúctil

**F<sub>a</sub>** – Soma de casos ativos de veículos que terão chocado com blocos de rocha caídos

**F<sub>p</sub>** – Soma de casos passivos de veículos que terão chocado com blocos de rocha

**F<sub>I</sub>, F<sub>II</sub>, F<sub>III</sub>, F<sub>IV</sub>** – Fatores de ajuste para o cálculo do  $RHRON_{básico}$

**F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>** – Fatores de ajuste para o cálculo do SMR

**L** – Comprimento da zona afetada pela queda de blocos

**q** – Filões de quartzo

Alfabeto grego

**$\alpha$**  – Ângulo entre a linha de medição e a direção da família de descontinuidades

$\alpha_j$  – Direção da descontinuidade

$\alpha_s$  – Direção da face do talude

$\beta_j$  – Inclinação da descontinuidade

$\beta_s$  – Inclinação da face do talude

$\delta$  – Filões de rochas básicas

$\gamma_a$  – Filões aplíticos

$\gamma \pi'_f$  – Granito não porfiroide de grão médio a fino ou de grão fino

$\gamma \pi'_g$  - Granito não porfiroide de grão grosseiro

$\gamma \pi'_m$  – Granito não porfiroide de grão médio a fino

$\gamma \pi_f$  – Granito porfiroide de grão fino

$\gamma \pi_g$  – Granito porfiroide de grão grosseiro e grosseiro a médio

$\gamma \pi_m$  – Granito porfiroide de grão médio a fino

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento e objetivos

As ferrovias são uma das principais vias de comunicação, que permitem a ligação de diversos locais por meio terrestre, com o intuito de transportar, de forma económica, cargas ou passageiros, sendo imprescindíveis ao sector económico de um país. Os primeiros caminhos-de-ferro, compostos por carris de madeira, foram construídos para benefício da atividade mineira, nomeadamente na indústria do carvão, no século XVII, altura em que os vagões ainda seriam puxados por homens ou animais. Uma década mais tarde, sofreram uma evolução e passaram a ser compostos por madeira e ferro, de modo a aumentar a sua resistência e durabilidade. Com o passar do tempo, terão sido inventadas as primeiras máquinas a vapor, as locomotivas, que atingiriam velocidades cada vez maiores e evoluíram até aos comboios que existem hoje em dia. Estes são elétricos ou eletromagnéticos e circulam sobre carris de aço e travessas em betão, aumentando significativamente a durabilidade da via-férrea. Contudo, os requisitos de traçado são maiores, em especial para garantir velocidades na ordem das centenas de quilómetros por hora.

Em Portugal, a história dos caminhos-de-ferro terá começado em meados do século XIX, onde nos finais da primeira metade do século começaram as primeiras tentativas para a sua implementação. O primeiro trecho (Lisboa-Carregado), terminado na segunda metade daquele século, precedeu outras ligações, nomeadamente as Linhas da Beira-Alta e do Douro. No final do século XIX, foi concluída a Linha do Oeste e, em inícios do século XX, ligaram-se as zonas do sul, como Setúbal, Évora, Beja, Faro e Vila Real de Santo António.

Tendo em conta a existência de problemas na rede ferroviária, tais como restrições no peso da carga a transportar, limites de velocidade ou problemas nas infraestruturas, nos finais do século XX, iniciou-se a modernização da rede de caminhos-de-ferro Portuguesa. Esta levou à substituição das carruagens de madeira remanescentes por carruagens metálicas que apresentariam maior segurança. Para além disso, começaram os melhoramentos no armamento das vias e nos métodos de conservação e manutenção das mesmas, eletrificação do transporte e, por fim, ampliação e modernização das estações.

Dada a importância que estas vias representam para um país, é necessário garantir o seu funcionamento adequado durante o seu período de utilização. Estas podem ser afetadas por problemas de diferente natureza relacionados, quer com a própria via, quer com movimentos de massa que instabilizam os taludes adjacentes, em particular os de escavação. Devido à geologia de Portugal, as ferrovias interseam particularmente maciços rochosos, pelo que, dada a antiguidade de algumas linhas e à descompressão natural dos maciços rochosos escavados, aqueles taludes de escavação - Figura 1.1, têm apresentado problemas de estabilidade. Estes

problemas estiveram na origem de alguns incidentes que implicaram intervenções para a respetiva estabilização, sendo a mais emblemática a dos taludes das Portas do Sol, em Santarém (Público, 2007).



**Figura 1.1 - Taludes de escavação rochosos em vias-férreas**

Os movimentos que desencadeiam a instabilização de um talude podem resultar da erosão superficial de trechos mais meteorizados, da falta de manutenção da cobertura vegetal ou ainda de sistemas de drenagem inexistentes, inadequados ou com manutenção insuficiente. Destes resultam os fenómenos de deslizamentos circulares, nas zonas de maciço mais meteorizado, e de queda de blocos rochosos - Figura 1.2, por queda livre, rolamento ou ressalto, deslizamentos planares, em cunha ou até mesmo tombamentos.



**Figura 1.2 – Blocos junto à ferrovia**

No que respeita à queda de blocos noutras infraestruturas lineares, rodovias, existem dois tipos de eventos perigosos possíveis de gerar acidentes:

- a) O bloco cai sobre o veículo aquando da sua trajetória;
- b) O bloco encontra-se já na via levando a que o veículo embata no mesmo.

Contrariamente ao que acontece nas ferrovias, nas rodovias existe geralmente a possibilidade do veículo se desviar do obstáculo, evitando, deste modo, a colisão. Nas ferrovias, não existe tal possibilidade, pelo que, o risco de ocorrer um acidente causado pelos movimentos de massa é maior, visto que os comboios não se conseguem desviar, ou a travar a tempo (Geotechnical Engineering Bureau, 2015). Assim, a vulnerabilidade das ferrovias a este tipo de eventos é elevada, representando, desta forma, um risco elevado, do qual podem resultar, para além de danos materiais, vítimas humanas.

Ao longo da história das ferrovias foram registados muitos acidentes em Portugal, como é o caso do descarrilamento ocorrido na Linha de Cascais, em 1952, provocado por movimentos de massa. Este acidente ficou conhecido como a Tragédia de Gibalta e dele resultaram dez mortos e trinta e oito feridos (Nascimento, 1980). Outro acidente mais recente, de 2007, foi o descarrilamento de um comboio que circulava na Linha do Tua, que originou três vítimas mortais. Este acidente terá sido causado pela queda de blocos de grandes dimensões na via-férrea, levando ao colapso da mesma e ao fim da sua utilização (Público, 2007).

A preocupação constante em estudar estas infraestruturas visa obter informações sobre os fenómenos instabilizadores, para que seja possível classificá-los quanto ao tipo, avaliar a vulnerabilidade da via, os potenciais danos causados e indicar as medidas de mitigação mais adequadas a cada caso. As medidas mitigadoras a aplicar tendem a eliminar ou, em última instância, reduzir os riscos detetados e considerados inaceitáveis pela sociedade.

Neste contexto, surge a presente dissertação, integrada no Mestrado em Engenharia Geológica, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Pretende-se prosseguir o trabalho de investigação desenvolvido, em anos anteriores, no âmbito de outras dissertações de mestrado (Gonçalves, 2014; Costa, 2015; Oliveira, 2010), para identificar e avaliar os riscos associados a trechos de taludes de escavação em maciços rochosos de infraestruturas viárias, a fim de obter de forma expedita um conjunto de medidas mitigadoras para os riscos detetados e baixá-los para níveis considerados toleráveis. Os casos investigados anteriormente correspondiam a rodovias em processo de reabilitação e, no presente estudo, abordam-se as ferrovias.

Neste estudo, recolhem-se e analisam-se os sistemas de classificação já publicados por diferentes autores que permitem avaliar os riscos associados a quedas de blocos em taludes de infraestruturas lineares, adaptando-os e aplicando-os a um caso de estudo real de uma ferrovia. Desta forma, recorre-se a diversas metodologias, Tabela 1.1, que contemplam desde trabalho de campo até trabalhos de gabinete, onde se procede ao tratamento dos dados recolhidos.

**Tabela 1.1 – Metodologia de trabalho adotada**

#### Revisão bibliográfica

- Mecanismos de rotura em taludes rochosos;
- Caracterização geotécnica de maciços rochosos;
- Classificações para análise, avaliação e gestão do risco;
- Medidas de mitigação;
- Recolha bibliográfica de dados de caracterização da zona de estudo.

#### Trabalho de campo

- Caracterização dos taludes e respetivos sistemas de descontinuidades;
- Ensaio *in situ* da dureza ao ressalto com recurso ao martelo de Schmidt;
- Caracterização das valas de captação.

#### Trabalho de gabinete

- Tratamento dos dados recolhidos em campo;
- Dimensionamento ideal das valas de captação segundo o ábaco de Ritchie;
- Aplicação do sistema de classificação para avaliação e gestão do risco (USMS);
- Sugestão e discussão das medidas de reabilitação.

#### Considerações finais

- Limitações no trabalho de investigação;
- Proposta para futuros trabalhos de investigação.

## 1.2 Organização da dissertação

Neste capítulo, para além do enquadramento e objetivo da temática abordada nesta investigação, expõe-se a estrutura em que a presente dissertação se encontra organizada, descrevendo os assuntos abordados em cada capítulo.

No Capítulo 2 procede-se ao enquadramento geral no que diz respeito a taludes de escavação rochosos, descrevem-se os movimentos de massa a eles associados e os perigos que representam para as ferrovias. Refere-se, ainda, o modo de caracterização geotécnica dos maciços rochosos, dando principal ênfase aos sistemas de classificações empíricas que visam avaliar e gerir o risco que um determinado talude pode representar para as infraestruturas viárias. Abordam-se algumas das medidas mitigadoras mais adotadas em taludes rochosos, tais como: medidas de reperfilamento, de reforço, de proteção e de drenagem. São também abordados os geossintéticos, não como uma medida de mitigação por si só, mas como uma medida complementar às anteriormente referidas.

No Capítulo 3 expõe-se o caso de estudo, com o respetivo enquadramento geológico, geotécnico, hidrogeológico e caracterização da ferrovia. Descrevem-se ainda as metodologias de trabalho adotadas e os dados de reconhecimento de campo.

No Capítulo 4 efetua-se a avaliação e gestão do risco que os taludes representam. Identificam-se e discutem-se as medidas de reabilitação mais adequadas a cada talude com recurso ao SMR. São ainda discutidas as medidas de estabilização sugeridas no Capítulo 2.

No Capítulo 5 sintetizam-se algumas considerações finais e propõem-se alguns trabalhos que podem ser realizados futuramente.

Os elementos que compõem a presente dissertação que não se encontrem referenciados pertencem ao autor. É ainda possível encontrar um conjunto de quatro anexos que complementam toda a informação presente no corpo da dissertação e dois apêndices com informação relativa ao estudo de caso.





## 2. Taludes rochosos em ferrovias

O presente capítulo tem por objetivo descrever os taludes rochosos e os movimentos de massa a estes associados, bem como a importância do seu estudo relativamente às infraestruturas viárias, nomeadamente as ferrovias.

### 2.1 *Generalidades*

Designa-se por talude, toda a superfície de terreno exposta que faz um determinado ângulo com a horizontal, resultante da exposição natural aos agentes de meteorização, de uma escavação ou de um aterro estabilizado. A sua evolução depende de vários agentes, naturais ou artificiais, sendo os mais importantes os de carácter geológico, como a litologia e a estrutura dos terrenos que o compõem, as condições climáticas locais e a ação antrópica.

Nesta dissertação dá-se atenção aos taludes de escavação construídos pelo Homem, por corte do terreno, sendo assim conhecidas as características dos materiais que os compõem.

Os taludes de escavação encontram-se particularmente associados às infraestruturas viárias. Assim, merecem especial atenção por parte da geotecnia, de forma a minimizar e/ou eliminar o risco que representam para as estruturas e infraestruturas envolventes, bem como para as vidas humanas.

Os acidentes que têm vindo a ocorrer naqueles taludes, ao longo de décadas, devem-se a diversos fatores instabilizadores que propiciam movimentos de massa de diversas naturezas, levando, assim, à obstrução das vias. Estes fatores podem ser divididos em **fatores internos**, aqueles que dependem das características do próprio material que constitui o talude (litologia, propriedades mecânicas e estrutura geológica) ou em **fatores externos**, todos aqueles que são exteriores ao próprio talude, nomeadamente as tensões induzidas, os agentes de meteorização e o regime hidráulico. Desta forma, é necessário estudar estes eventos aquando da análise da respetiva estabilidade ou da realização de obras de reabilitação. Aliados a estes fatores, ocorrem outros problemas inerentes à execução dos próprios taludes e que se devem, às vezes, aos sistemas de drenagem, que em muitos casos são inexistentes, inadequados ou se encontram em mau estado de conservação. Essa deficiência dos sistemas de drenagem leva à infiltração da água nas zonas de fraqueza do maciço, levando ao aumento das tensões neutras que, por sua vez, provocam a diminuição da sua resistência ao corte. Outro problema, também ele recorrente, é a acumulação de água nas zonas de fraqueza do maciço que, juntamente com a variação de temperatura, originam ciclos de gelo-degelo, destacando os blocos do maciço e, assim, aumentando a probabilidade de queda de blocos nas vias.

## **2.2 Movimentos de massa típicos em taludes rochosos**

Um movimento de massa é qualquer deslocamento de um bloco rochoso, quantidade de solo ou detritos ao longo de uma superfície de ruptura em um talude, que pode causar alterações desde a crista ao sopé do mesmo (AGS, 2007).

A origem dos movimentos de massa envolve fenómenos naturais ou de causa humana. Os fenómenos naturais incluem as precipitações elevadas, a atividade sísmica e o crescimento de vegetação arbórea ou arbustiva na face do talude, entre outros. As intervenções humanas incluem a alteração da morfologia do talude, as atividades mineiras, as construções em encostas, a interferência com os sistemas de drenagem naturais do talude e as obras de caráter geotécnico (*op. cit.*).

Os movimentos de massa podem apresentar-se de várias formas, dependendo do tipo e quantidade de material movimentado e as suas causas. A presente secção trata os movimentos frequentes em taludes rochosos, quer em rodovias, quer em ferrovias, fundamentados na classificação proposta por Varnes (1978) e suas ulteriores adaptações. Esta é uma classificação universalmente aceite, que se baseia no tipo de material e tipo de movimentos que podem ocorrer na superfície de taludes rochosos. Uma nova adaptação a esta classificação foi proposta por Hungr et al (2014), que mantém os cinco principais tipos de movimentos da classificação original e substitui o sexto por um novo termo, o qual denominam de “*slope deformation*”. Apesar do sistema de classificação proposto não incluir uma classe separada para movimentos complexos, estes autores admitem que poderá ser necessário recorrer ao nome de dois tipos de movimentos diferentes, cabendo a decisão da necessidade do uso de tal terminologia ao utilizador da classificação. A Tabela 2.1 esquematiza esta nova adaptação e a Tabela 2.2 caracteriza os mecanismos mais frequentes na envolvente de vias.

**Tabela 2.1 - Adaptação da classificação de Varnes segundo Hungr et al., 2014**

<b>Tipo de movimento</b>	<b>Rocha</b>
<b>Quedas (<i>Fall</i>)</b>	de rocha/gelo ( <i>Rock/ice fall</i> )
<b>Deslizamentos (<i>Slide</i>)</b>	rotacional de rocha ( <i>Rock rotational slide</i> )
	planar de rocha ( <i>Rock planar slide</i> )
	em cunha de rocha ( <i>Rock wedge slide</i> )
	composto de rocha ( <i>Rock compound slide</i> )
	irregular de rocha ( <i>Rock irregular slide</i> )
<b>Tombamentos (<i>Topple</i>)</b>	de blocos ( <i>Rock block topple</i> )
	flexural de rocha ( <i>Rock flexural topple</i> )
<b>Expansão (<i>Spread</i>)</b>	expansão de taludes rochosos ( <i>Rock slope spread</i> )
<b>Fluxo (<i>Flow</i>)</b>	de rocha/gelo ( <i>Rock/ice avalanche</i> )
<b>Deformação do talude (<i>Slope deformation</i>)</b>	deformação de taludes montanhosos ( <i>Mountain slope deformation</i> )
	deformação de talude rochoso ( <i>Rock slope deformation</i> )

*adaptado de Hungr et al., 2014*

**Tabela 2.2 - Mecanismos de rotura frequentes em taludes rochosos**


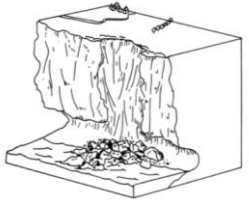
Mecanismos de rotura	Descrição	Esquema	
<p><b>Queda de blocos</b></p>	<p>Mecanismo comum quando se trata de taludes rochosos. Consiste na queda de massas, separando-as da superfície do talude a partir de um ponto elevado e cujas inclinações são bastante acentuadas. Estes movimentos são bruscos, variando de muito rápidos a extremamente rápidos. Segundo Flageollet &amp; Webber (1996), a estes movimentos podem estar associados diferentes tipos de materiais (rocha, detritos ou solo) e podem ocorrer segundo diferentes planos de rotura (planar, em cunha ou escadaria vertical). A trajetória da queda de blocos pode ocorrer de diferentes formas: <b>queda livre</b>, <b>ressalto</b> ou <b>rolamento</b>.</p>	 <p><b>Queda livre</b></p> <p><b>Ressalto</b></p> <p><b>Rolamento</b></p> <p><i>Ayala, 1987</i></p>	 <p><i>Dikau et al., 1996</i></p>

Tabela 2.2 - Mecanismos de rotura frequentes em taludes rochosos (continuação)

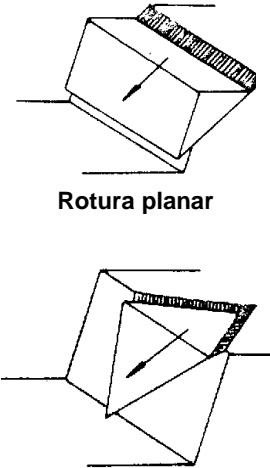
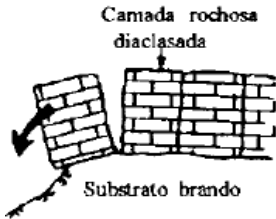

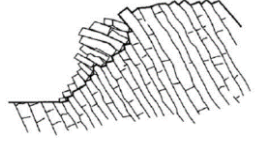
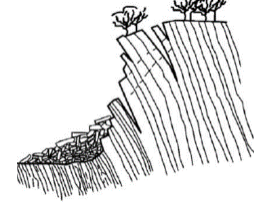
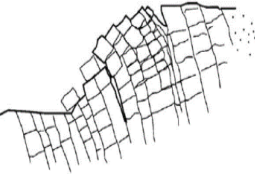
Mecanismos de rotura	Descrição	Esquema
Deslizamentos	<p>São movimentos menos frequentes em taludes rochosos, no entanto, podem ocorrer quando estes apresentam superfícies muito degradadas devido a fenómenos de erosão, ou quando se trata de rochas brandas.</p> <p>Varnes (1978), descreveu este mecanismo como aquele que ocorre quando o material percorre uma superfície de cisalhamento geralmente visível ou relativamente deduzida. O mesmo autor, em 1978, terá dividido este mecanismo em dois importantes grupos: <b>deslizamentos rotacionais</b> (no caso dos solos) e os <b>deslizamentos translacionais</b>. Nos deslizamentos translacionais o terreno desloca-se para fora e para baixo, ao longo de uma superfície mais ou menos plana suavemente ondulada com pequenos movimentos de rotação. Estes são geralmente controlados por superfícies geotecnicamente instáveis, (planos de falhas, famílias de diaclases ou fraturas, zonas de cisalhamento entre camadas) podem ser segundo planos de rotura <b>planares</b> ou em <b>cunha</b>.</p>	 <p>Rotura planar</p> <p>Rotura em cunha</p> <p><i>Hoek &amp; Bray, 1994</i></p>

Tabela 2.2 - Mecanismos de rotura frequentes em taludes rochosos (continuação)

Mecanismos de rotura	Descrição	Esquema	
<p><b>Tombamentos</b></p>	<p>Movimentos de rotação para a frente de um ou mais blocos sob forma de painel, sobre um ponto no eixo situado abaixo do centro de gravidade dos mesmos. Estes movimentos propiciam-se devido à ação da gravidade, forças exercidas por blocos adjacentes e forças hidrostáticas. (Varnes, 1978). Estes dividem-se em <b>singulares</b> e <b>múltiplos</b>, (Hutchinson, 1988), dependendo da quantidade de blocos envolvida no movimento.</p> <p>Aos tombamentos múltiplos estão associados os tombamentos <b>de blocos, flexurais</b> ou <b>mistos</b>, que variam consoante as características das discontinuidades que constituem o maciço.</p>	 <p>Camada rochosa diaclasada</p> <p>Substrato brando</p> <p><b>Movimento singular</b></p>  <p><b>Movimento múltiplo</b></p> <p><i>Hutchinson, 1988</i></p>	 <p><b>Tombamento múltiplo por bloco</b></p>  <p><b>Tombamento múltiplo flexural</b></p>  <p><b>Tombamento múltiplo misto</b></p> <p><i>Goodman &amp; Bray, 1976</i></p>

Um movimento de massa pode provocar deslocamento desde pequenos seixos a megagramas de material. Estes podem mover-se apenas alguns centímetros por ano ou atingir velocidades de metros por segundo (ABCB, 2015). Formulada por Varnes (1978) e mais tarde revista por Cruden & Varnes (1996), a classificação de velocidades de deslocamento encontra-se dividida em sete diferentes classes, variando do extremamente rápido ao extremamente lento - Tabela 2.3. Estas descrevem-se consoante a distância que um bloco percorre num determinado intervalo de tempo, contemplando as respostas do Homem perante as diferentes situações. Para o caso das quedas de blocos estas podem ser movimentos muito rápidos a extremamente rápidos.

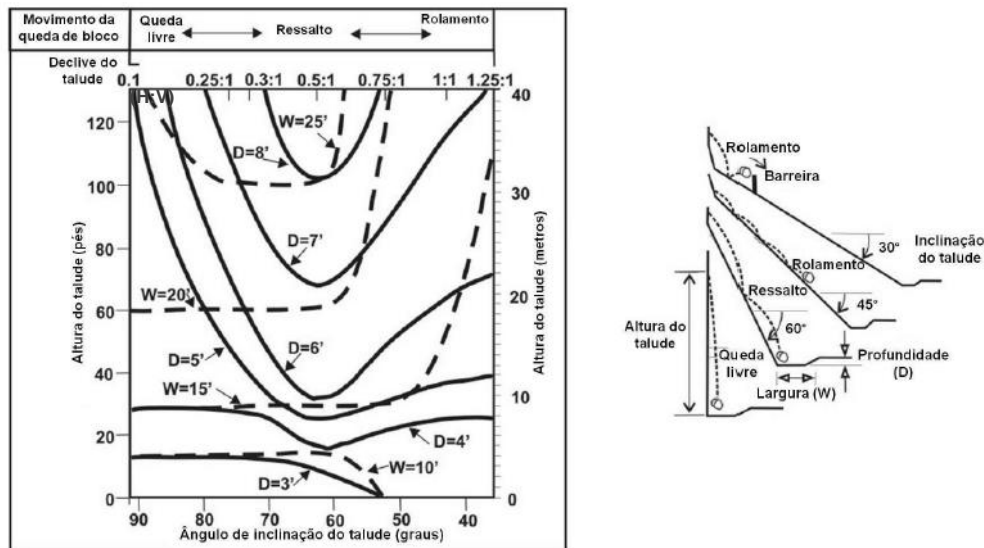
**Tabela 2.3 - Termos descritivos da velocidade dos movimentos de massa segundo Cruden & Varnes (1996)**

Classes de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade característica	Resposta humana
7	Extremamente rápido	$5 \times 10^3$	5 m/seg	Nenhuma
6	Muito rápido	$5 \times 10^1$	3 m/min	Nenhuma
5	Rápido	$5 \times 10^{-1}$	1,8 m/h	Evacuação
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mês	Evacuação
3	Lento	$5 \times 10^{-5}$	1,6 m/ano	Manutenção
2	Muito lento	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/ano	Manutenção
1	Extremamente lento			Nenhuma

*adaptado de Fell et al. 2000*

Ritchie (1963) estudou o mecanismo da queda de blocos, analisando centenas de taludes, ao longo de rodovias, registando a sua trajetória e o seu alcance. Este estudo permitiu ao autor elaborar um critério que possibilita o dimensionamento ideal das valas de captação (*ditches*), determinando a sua largura e profundidade, tendo em conta a inclinação e altura do talude. Este autor constatou que a trajetória dos blocos depende da inclinação do talude e que, na ausência de variação do movimento linear para o movimento angular, um bloco em queda livre dificilmente produzirá ressalto após o seu impacto.

Mais tarde este critério foi transformado em ábaco pelo *Federal Highway Administration* – FHWA - Figura 2.1, de modo a facilitar a sua aplicação.



D – Profundidade da vala de captação, L – Largura da vala de captação

in Costa, 2015

**Figura 2.1 – Ábaco de Ritchie utilizado no dimensionamento das valas de captação**

## 2.3 Caracterização de taludes de escavação

No contexto da geotecnia a caracterização dos maciços rochosos é um processo fundamental que visa avaliar o seu estado e comportamento face às diferentes solicitações a que estes possam estar sujeitos. Nesta secção sintetizam-se as características que influenciam o comportamento de taludes rochosos.

Geralmente, esta é uma etapa que se inicia com a observação, cujo principal objetivo é identificar, em campo, as zonas de fraqueza, variações na litologia, presença de água e possíveis alterações na superfície do maciço, causados pelos fenómenos de erosão ou de instabilização. Em seguida, caracteriza-se geológica e estruturalmente o material que compõe o talude como a atitude das camadas, famílias de discontinuidades, o grau de alteração e de fracturação. Nesta fase é possível conjugar as técnicas de observação com a realização de ensaios expeditos *in situ* e, posteriormente, se necessário, amostragem e realização de ensaios de laboratório.

### 2.3.1 Parâmetros descritivos

A descrição dos maciços rochosos é realizada segundo a *Basic Geotechnical Description* – BGD, desenvolvida pela ISRM (1980), que permite ao utilizador caracterizar, de forma geral, o comportamento mecânico do maciço rochoso. Segundo a ISRM (1980), esta descrição considera três fatores:



- i. O nome da rocha, segundo uma descrição geológica simplificada;
- ii. Duas características estruturais do maciço rochoso: a) espessura das camadas, para maciços estratiformes, ou o espaçamento entre fraturas;
- iii. Duas características mecânicas, nomeadamente a Resistência à Compressão Uniaxial – RCU, e o ângulo de atrito das fraturas.

Referem-se ainda, dada a sua aplicação no reconhecimento de campo efetuado no âmbito do presente estudo, o grau de alteração e o grau de fracturação - Tabela 2.4 e Tabela 2.5, definidas segundo a ISRM (1978).

**Tabela 2.4 - Descrição do grau de alteração de um maciço rochoso**

Grau	Descrição	Designação
W <sub>1</sub>	A rocha não apresenta sinais de alteração	São
W <sub>2</sub>	Sinais de alteração apenas nos planos e bordos das descontinuidades	Pouco alterado
W <sub>3</sub>	Alteração visível em todo o maciço rochoso	Medianamente alterado
W <sub>4</sub>	Alteração visível em todo o maciço rochoso e a rocha apresenta-se friável (mudança de cor)	Muito alterado
W <sub>5</sub>	O maciço apresenta-se completamente friável (comportamento de solo)	Decomposto

*adaptado de ISRM, 1980*

**Tabela 2.5 – Descrição do grau de fraturação de um maciço rochoso**

Intervalo (cm)	Grau	Descrição
>200	F <sub>1</sub>	Muito afastadas
60-200	F <sub>2</sub>	Afastadas
20-60	F <sub>3</sub>	Medianamente afastadas
6-20	F <sub>4</sub>	Próximas
<6	F <sub>5</sub>	Muito próximas

*adaptado de ISRM, 1980*

Outro parâmetro igualmente importante na caracterização dos taludes rochosos, e que influencia o seu comportamento são os sistemas de descontinuidades. Estes, segundo a ISRM (1978), podem ser de diferentes tipos - Tabela 2.6. Os parâmetros envolvidos na caracterização destes sistemas são:

- i. Atitude ou orientação;

- ii. Espaçamento;
- iii. Persistência;
- iv. Abertura;
- v. Enchimento ou preenchimento;
- vi. Rugosidade
- vii. Resistência das paredes;
- viii. Infiltração.

Os parâmetros necessários para caracterizar os sistemas de descontinuidades segundo a ISRM (1978) e que foram utilizados no âmbito do reconhecimento de campo realizado são apresentados no ANEXO A.

**Tabela 2.6 – Tipos de descontinuidades**

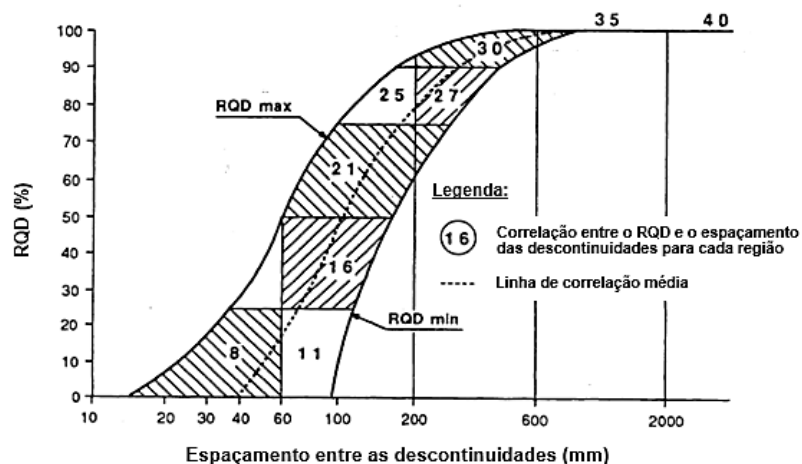
Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
<b>Planares</b>	Diaclases e fendas	Falhas Discordâncias Filões
	Planos de estratificação	
	Planos de xistosidade	
	Planos de laminação	
<b>Lineares</b>	Lineações	Eixos de dobras
	Intersecção de descontinuidades planares	

*adaptado de Vallejo et al., 2004*

Para além destes parâmetros que caracterizam o maciço rochoso, existem ainda classificações que avaliam a qualidade dos mesmos, com base numa série de fatores. Referem-se pela sua importância neste estudo o *Rock Quality Designation* – RQD, o *Rock Mass Rating* – RMR e o *Slope Mass Rating* - SMR.

O RQD descreve a qualidade do maciço rochoso a partir da percentagem de rocha intacta recuperada num furo de sondagem – equação 2.1. Este parâmetro pode ser obtido através de diferentes formas, sendo que neste estudo se recorreu ao método gráfico, que permite obter um valor médio de RQD através do espaçamento entre as descontinuidades - Figura 2.2. Este método é uma solução a adotar em estudos expeditos apenas com reconhecimento de campo e sem perfuração, sendo qualificado segundo ASTM D 6032-96 (2008) - Tabela 2.7.

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\sum \text{Troços de tarolo com comprimento} > 100\text{mm}}{\text{Comprimento total da manobra}} \times 100 \quad 2.1$$



adaptado de Bieniawski, 1989

**Figura 2.2 – Gráfico de correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades**

**Tabela 2.7 – Descrição da qualidade da rocha segundo os diferentes intervalos de RQD**

RQD (%)	Descrição da qualidade da rocha
0-25	Rocha muito fraca
25-50	Rocha fraca
50-75	Rocha medianamente fraca
75-90	Rocha boa
90-100	Rocha excelente

adaptado de ASTM, 2008

Em relação ao RMR, esta é uma classificação proposta por Bieniawski (1989), que atribui um índice de qualidade compreendido entre 0 e 100 ao maciço rochoso, que se obtém através do somatório dos pesos relativos de seis parâmetros: **i)** Resistência da rocha intacta; **ii)** RQD; **iii)** Espaçamento das descontinuidades; **iv)** Condições das descontinuidades; **v)** Percolação de água e **vi)** Orientação das descontinuidades. Quando este valor não se encontra corrigido, isto é, quando não considera o critério *Orientação das descontinuidades*, denomina-se por  $RMR_{básico}$ . Os parâmetros e respetivos pesos utilizados neste sistema descrevem-se no ANEXO B.

O SMR é uma modificação do RMR proposta por Romana (1985; 1993) e atualizada por Romana et al. (2003), consistindo num sistema geomecânico direcionado a taludes rochosos; o valor do índice provém do  $RMR_{básico}$  e ao qual acrescem fatores de ajuste:

- i. Um dependente da orientação relativa entre as descontinuidades e o talude rochoso;
- ii. Um em função do método de desmonte.

Deste modo, calcula-se o SMR – equação 2.2 para cada família de descontinuidades, optando-se pelo menor valor deste índice, que representa o caso mais crítico para o talude, atribuindo-se-lhe um conjunto potencial de medidas de remediação adequadas –Tabela 2.8.

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{básico}} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad 2.2$$

Onde:

$F_1$ : Depende do paralelismo entre as direções da face do talude e da descontinuidade; compreendido entre 1,00 (quando ambos são quase paralelos) a 0,15 (quando o ângulo entre eles é  $>30^\circ$  e a probabilidade de rotura é muito baixa);

$F_2$ : Refere-se à inclinação da descontinuidade num modo de rotura planar;

$F_3$ : Reflete a relação da inclinação entre a descontinuidade e a face do talude;

$F_4$ : Fator de ajuste relativo ao método de escavação obtido de forma empírica.

**Tabela 2.8 - Medidas de estabilização de taludes sugeridas por Romana et al. (2003)**

Medidas		Valor de SMR
Correção	Sobreescavação	10 – 30
	Muros de contenção	
Drenagem	Drenagem superficial	10 – 40
	Drenagem profunda	
Reforço (com betão)	Betão projetado	20 – 60
	Betão de limpeza	
	Vigas e/ou contrafortes	
	Muros no pé do talude	
Reforço (com inclusões)	Pregagens	30 – 75
	Ancoragens	
Proteção	Valas de pé de talude	45 – 70
	Vedações no talude ou sopé	
	Redes	
Sem suporte	Reperfilamento	65 – 100
	Nenhum	

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

### 2.3.2 Avaliação e gestão do risco em taludes

Para avaliar a necessidade de intervenção em taludes de infraestruturas lineares a céu aberto existem já publicados alguns sistemas de classificação, essencialmente aplicados em rodovias.

Refere-se, pela sua maior aplicação, o SMR (Romana, 1985; 2003), anteriormente mencionado-seção 2.3.1, que apesar de avaliar a probabilidade do evento e recomendar potenciais medidas mitigadoras, não avalia os riscos inerentes a um evento e, portanto, não permite priorizar a necessidade intervenção. No âmbito de trabalhos de reabilitação é fundamental avaliar esse risco e, desse modo, avaliar a necessidade de aplicar medidas mitigadoras para eliminar ou, eventualmente, minimizar esses riscos.

De modo a avaliar o potencial de queda de blocos (sentido lato) em rodovias e intervencionar os taludes que representam risco, foi elaborado um sistema de classificação denominado *Rockfall Hazard Rating System* – RHRS por Wyllie (1987). Este tem como principal finalidade avaliar e classificar taludes em rodovias de forma a possibilitar a identificação e tratamento prioritário daqueles cuja probabilidade de ocorrer um movimento de massa com consequências graves seja elevada. Este sistema foi desenvolvido pela primeira vez para o estado de *Oregon*, Estados Unidos da América - EUA, e, mais tarde, foi melhorado por Pierson et al. (1990;1993). Aplica-se a vias cujos taludes se encontrem em perigo iminente de fenómenos de queda de blocos, que necessitem de manutenção urgente ou de estudos aprofundados.

Com o passar dos anos, este sistema tem vindo a ser adaptado por diferentes estados dos EUA, e até mesmo por alguns países como o Canadá e a Itália. Algumas alterações têm vindo a ser efetuadas, de maneira a tornar este sistema compatível com as características climatéricas, geológicas e estruturais de cada zona. Estas adaptações, resultam noutras designações como *Rockfall Hazard Rating System for Ontario* - RHRON, proposto por Franklin & Senior (1997), adequada a taludes com alturas reduzidas, ou a *Missouri Rockfall Hazard Rating System* - MORHRS, proposta por Youssef et al (2003), utilizada em taludes de explorações a céu aberto. Outra adaptação é a versão *Rockfall Hazard Rating System modified* - mRHRS de Budetta (2004), que reformulou alguns critérios para que estes pudessem ser aplicados em Itália. Dela resulta ainda a *Slope Quality Index* - SQI de Pinheiro et al (2015), que permite avaliar taludes rochosos em rodovias, atribuindo-lhes um índice de qualidade que varia entre 1 e 5, caracterizando, desta forma, o estado do talude e o nível de risco que este representa.

A estas classificações podem estar aliados modelos de simulação sofisticados que permitem prever ou reproduzir possíveis trajetórias da queda de blocos, tais como os de Bozzolo et al.(1988), Spang & Rautenstrauch (1988), Hungr & Evans (1989) e Azzoni et al. (1995). Estes incluem a simulação de Monte Carlo, que se caracteriza por fazer variar os diferentes parâmetros entre valores limite que são utilizados na modelação permitindo, assim, obter as diversas trajetórias possíveis de ocorrer e avaliar a inerente probabilidade de rotura.

Na Tabela 2.9 resumiram-se os critérios adotados nos diferentes sistemas classificativos. Estes critérios relacionam-se com as características geológicas, morfológicas e estruturais dos taludes, as características das valas de captação, as condições da via, os diferentes mecanismos de rotura que possam levar à instabilização do talude, as condições climatéricas e os custos de manutenção envolvidos.

No que diz respeito às características geométricas do talude (critérios de 1 a 9), verifica-se que a *Altura do talude* é um critério comum a quase todos os sistemas analisados, com exceção do TRHRS, do ODOT II e do RHRON. Quanto aos critérios 9 a 15 referentes à caracterização dos blocos, a *Dimensão dos blocos*, por vezes substituída pelo *Volume dos blocos*, é considerada em oito dos sistemas descritos, sendo um critério importante, pois relaciona-se com a eficácia de captação das valas de proteção e captação. Relativamente às valas de captação (critérios 49 a 51), o critério *Eficácia da vala* é adotado por sete sistemas e traduz a capacidade da vala reter os blocos originados pelos mecanismos instabilizadores, impedindo-os de atingir a via.

Na caracterização da via (critérios 33 a 44) a *Distância de visibilidade de decisão – DVD* e o *Tráfego médio diário – TMD*, são dois dos critérios mais utilizados nesta categoria. Considera-se a DVD um fator essencial, uma vez que envolve a reação e resposta do condutor face ao perigo resultante de uma rotura. A *Análise custo-benefício* e os *Custos de manutenção* são considerados por poucos sistemas, como é o caso do USMS, do ODOT II, do RHRON e do USMP. Estes incluem a análise dos custos de reparação permanente e/ou durante um determinado período de tempo.

As *Condições climatéricas* são um fator igualmente importante e é comum a sete dos sistemas. Estas condições envolvem a precipitação e os ciclos de gelo-degelo (critérios 11 a 13). Os sistemas mRHR e SQI avaliam a qualidade dos maciços recorrendo a algumas classificações empíricas como: SMR, RMR e Q. Características como: a *Magnitude* e o *Alcance* são critérios exclusivos do sistema sugerido pelo RHRON e referem-se à magnitude do evento e o alcance dos blocos. Os sistemas de estabilização previamente empregues nos taludes, são considerados apenas pelo SQI, bem como as inspeções visuais aos taludes.

Tabela 2.9 – Critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação da avaliação do risco

	Critérios	RHRS (1992)	NYSDOT (1993)	WSDOT (1993)	TRHRS (2000)	UDOT (2001)	ODOT II (2001)	CRHRS (2003)	MORH RS (2004)	mRHRS (2004)	OHDOT (2007)	AKDOT&PF (2009)	RHRON (2013)	RHRSm2 (2015)	SQI (2015)
1	Altura do talude	X	X	X		X		X	X	X	X	X		X	X
2	Ângulo da crista												X		
3	Inclinação do talude	X			X			X	X			X		X	X
4	Comprimento do talude		X			X									
5	Morfologia do talude							X							
6	Trecho do talude acima da crista		X			X									
7	Largura das banquetas								X					X	X
8	Irregularidade na face do talude				X				X				X	X	
9	Perda de material na face do talude												X		
10	Caraterização geológica ou estrutural	X	X	X		X							X		X
11	Clima e presença de água		X			X		X	X	X				X	X
12	Ciclos de gelo-degelo											X			
13	Gelo-degelo (solos)											X			
14	Vegetação		X			X		X							
15	Historial de queda de blocos	X		X						X		X	X	X	X
16	Dimensão dos blocos	X	X	X	X	X			X	X		X			

**Tabela 2.9 – Critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação da avaliação do risco (continuação)**

	<b>Critérios</b>	<b>RHRS (1992)</b>	<b>NYSDOT (1993)</b>	<b>USMS (1993)</b>	<b>TRHRS (2000)</b>	<b>UDOT (2001)</b>	<b>ODOT II (2001)</b>	<b>CRHRS (2003)</b>	<b>MORH RS (2004)</b>	<b>mRHRS (2004)</b>	<b>OHDOT (2007)</b>	<b>USMP (2009)</b>	<b>RHRON (2013)</b>	<b>RHRSm2 (2015)</b>	<b>SQI (2015)</b>
17	Volume dos blocos	X		X	X					X				X	
18	Forma dos blocos							X							
19	Volume/quantidade de blocos por evento (potencial)								X	X		X	X	X	
20	Fatores desencadeadores							X							
21	Atrito interno da rocha				X			X							
22	Lamelação							X							
23	Sistemas empíricos (SMR, RMR, Q)									X					X
24	Taxa de erosão													X	
25	Grau/ condições de alteração							X	X					X	X
26	Resistência da rocha intacta								X				X		
27	Instabilidade do material								X						
28	Características das descontinuidades				X			X				X			
29	Tipo de rotura						X								
30	Frequência de rotura			X				X							
31	Caracterização dos mecanismos de rotura				X										X



**Tabela 2.9 – Critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação da avaliação do risco (continuação)**

	Critérios	RHRS (1992)	NYSDOT (1993)	USMS (1993)	TRHRS (2000)	UDOT (2001)	ODOT II (2001)	CRHRS (2003)	MORH RS (2004)	mRHRS (2004)	OHDOT (2007)	USMP (2009)	RHRON (2013)	RHRSm2 (2015)	SQI (2015)
32	Largura da via			X						X				X	
33	Número de faixas														
34	Tipo de via				X										
35	Impacto da rotura na via			X			X				X				
36	Impedância da via			X											
37	Danos no pavimento			X											
38	Risco médio para o veículo			X					X	X		X	X		
39	Risco para os condutores	X													
40	Distância de visibilidade decisão	X	X	X		X			X		X	X	X	X	
41	Impacto no tráfego											X			
42	Tráfego médio diário		X	X		X	X				X	X			X
43	Historial de acidentes no tráfego			X			X				X	X			
44	Zonas de influência													X	X
45	Custos de manutenção			X								X	X		
46	Análise custo/benefício			X			X								
47	Frequência de manutenção			X					X		X	X			
48	Fator económico			X											
49	Eficácia da vala			X				X	X	X		X	X	X	
50	Volume da vala								X						

**Tabela 2.9– Critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação da avaliação do risco (continuação)**

	<b>Critérios</b>	<b>RHRS (1992)</b>	<b>NYSDOT (1993)</b>	<b>USMS (1993)</b>	<b>TRHRS (2000)</b>	<b>UDOT (2001)</b>	<b>ODOT II (2001)</b>	<b>CRHRS (2003)</b>	<b>MORH RS (2004)</b>	<b>mRHRS (2004)</b>	<b>OHDOT (2007)</b>	<b>USMP (2009)</b>	<b>RHRON (2013)</b>	<b>RHRSm2 (2015)</b>	<b>SQI (2015)</b>
51	Largura da vala								X						
52	Classe do perigo											X		X	
53	Magnitude												X		
54	Instabilidade												X		
55	Alcance												X		
56	Consequências								X				X		
57	Sistemas de drenagem														X
58	Sistemas de proteção														X
59	Inspeções visuais														X

Nas células a verde e com cruz encontram-se assinalados os critérios utilizados nos diferentes sistemas de classificação.

### 2.3.2.1 *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS): descrição e adaptações

Nesta secção abordam-se, por ordem cronológica, os sistemas de classificação mencionados na Tabela 2.9, bem como as respetivas adaptações. Pretende-se, ainda selecionar, um dos sistemas, direcionados para rodovias, descrevê-lo e torná-lo aplicável a taludes rochosos em ferrovias.

O *Rockfall Hazard Rating System* foi o primeiro sistema a ser proposto para tratar problemas de movimentos de massa. É um sistema que visa classificar o perigo de queda de blocos em rodovias, com base na avaliação das características da via e dos taludes que as integram. Anos mais tarde, o Departamento dos Transportes de *Oregon* (ODOT) modificou este sistema de modo a avaliar a exposição ao risco, que se encontra associado à queda de blocos, e priorizar as intervenções ou estudos aprofundados a realizar para que se adote as devidas medidas de estabilização.

A aplicação do RHRS envolve duas fases, uma preliminar e outra que exige uma avaliação mais detalhada. A fase preliminar, tem como base dois critérios principais que consideram a análise de alguns fatores - Tabela 2.10.

**Tabela 2.10 - Fatores analisados para obtenção dos critérios envolvidos na fase preliminar (RHRS)**

Potencial estimado para existência de blocos na via	Historial da atividade de queda de blocos
Tamanho estimado do material	Frequência de queda de blocos na rodovia
Quantidade de material estimada por evento	Quantidade de material
Total de material esperado na queda	Tamanho do material
Eficácia da vala	Frequência de limpeza da rodovia

Após a análise destes critérios é atribuída uma classe ao talude, que varia de A a C -Tabela 2.11, de modo a classificar a urgência que este apresenta em ser analisado detalhadamente, uma vez que pode pôr em risco a via, os veículos, as estruturas adjacentes e a população das zonas envolventes. A descrição das classes é a seguinte:

- **Classe A:** o talude exhibe evidências de deslocamentos e a área de captação é limitada;
- **Classe B:** há possibilidade de queda de blocos, mas a frequência é baixa o suficiente ou a área de captação apresenta largura suficiente;
- **Classe C:** é improvável que o bloco caia na via. No entanto, na eventualidade disso acontecer, é improvável que venha a atingir a via.

**Tabela 2.11 - Sistema de classificação preliminar**

<b>Crítérios</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Potencial estimado para existência de blocos na via	Elevado	Moderado	Baixo
Historial da atividade de queda de blocos	Elevado	Moderado	Baixo

*L. Pierson & Van Vickie, 1993*

Para aplicar o sistema de classificação RHRS, é necessário que os taludes estejam enquadrados nas classes A ou B. A aplicação deste sistema envolve a avaliação da altura do talude, da eficácia da vala, do risco médio para veículos, da distância de visibilidade de decisão, da largura da via, das condições estruturais, da rugosidade entre os planos, da taxa de erosão, do volume e do tamanho dos blocos, do clima e do histórico de queda de blocos, e atribuição da respetiva pontuação, conforme se define no ANEXO C (Pierson & Van Vickie, 1993).

Cada um dos critérios é calculado individualmente e, posteriormente, é atribuída a cada um uma pontuação que varia entre 3 e 81 pontos, estabelecida de forma exponencial através da equação 2.3.

$$y = 3^x \quad 2.3$$

Onde:

x - Representa o valor obtido para cada um dos critérios segundo a metodologia estabelecida no ANEXO C.

Quanto menor a pontuação, menor o risco de rotura. Por fim, somam-se as pontuações atribuídas para os diversos critérios e avalia-se o risco de cada talude em particular segundo as duas condições seguintes:

- i. Se a soma for inferior a 300, considera-se o risco baixo, devendo ser tomadas medidas de mitigação a curto ou médio prazo;
- ii. Se a soma for superior a 500, então o risco é elevado, e devem ser tomadas medidas com a urgência máxima.

Muitas adaptações e reformulações têm vindo a ser efetuadas a este sistema. Estas concentram-se, principalmente, nos EUA, apesar de alguns estados terem optado por manter este sistema inalterado como a Califórnia, Virgínia, Nevada e Pensilvânia. Contudo, outros, como Nova Iorque, Colorado, Missouri e Washington, alteraram alguns critérios da classificação devido a condicionantes específicas, como as condições climáticas adversas ou as características geológicas particulares de cada um dos estados americanos.

Descrevem-se de seguida algumas das reformulações efetuadas aos diferentes critérios e referem-se alguns critérios que terão sido adicionados (Santi et al., 2008).

- **Estado de Nova Iorque - (NYDOT)**

Em 1988, o Departamento dos Transportes de Nova Iorque (NYSDOT), terá revisto o sistema de classificação desenvolvido pelo *Geotechnical Engineering Bureau*, baseado na versão da classificação de Wyllie (1987) (Darrow et al., 2009), onde:

- a) Foram isolados três fatores considerados importantes no que respeita aos acidentes causados pela queda de blocos, sendo eles: o *Fator geológico*, o *Fator de exposição humana* e o *Fator de secção*;
- b) O risco associado a um veículo embater num bloco caído ou, um bloco cair sobre um veículo que passe, é abordado de forma mais objetiva.
- c) O sistema considera tanto o risco representado por um talude rochoso natural, como o risco residual após aplicadas as medidas de remediação.

Em 1993, foram realizadas atualizações de forma a melhorar o antigo sistema, priorizando o Risco Total Relativo – RTR, que é definido como o benefício proporcionado após a implementação das medidas de tratamento de um talude rochoso. Este é calculado com recurso aos fatores mencionados em a), caracterizando-os da seguinte forma:

- i. **Fator geológico (FG):** refere-se ao risco de ocorrência de queda de blocos, baseado na geologia e nas propriedades físicas do talude. Para obtenção deste fator somam-se as pontuações dos critérios da Tabela D.1 – ANEXO D e dividem-se por 10. Cada um dos critérios está pontuado de 1 a 81, onde 1 é o caso de menor risco e 81 o de maior risco. Para as diferentes pontuações totais obtidas é atribuído, ao talude, um nível de risco para os potenciais mecanismos de rotura – Tabela D.2.
- ii. **Fator de secção (FS):** consiste no risco, relativo, dos blocos de rocha atingirem a via após a sua queda. Este fator está relacionado com a geometria da vala e o deslocamento do bloco ao longo do talude. Calcula-se segundo a equação 2.4:

$$FS = \frac{(PV + LV)}{(P_R V + DV)} \quad 2.4$$

Onde:

*PV* - Profundidade da vala (m);

*LV* - Largura da vala (m);

$P_RV$  - Profundidade real da vala;

$DV$  - Deslocamento do bloco até à base do talude.

- iii. **Fator de exposição humana (FEH):** É o risco relativo de ocorrer um acidente de trânsito provocado pela queda de blocos na via. Pode ser calculado através da equação 2.5.

$$FEH = \frac{(F_a + F_p)}{3} \quad 2.5$$

Onde:

$F_a$  = Soma de casos ativos de veículos que terão chocado ou sido atingidos por blocos de rocha caídos

$F_p$  = Soma de casos passivos de veículos que terão chocado com blocos de rocha na via sendo,

$$F_a = MATD \times \frac{L + DVD}{v \times 24000} \quad 2.6$$

$$F_p = \log_{10}(MATD) \times \log_{10}(L) \frac{a}{DVD - a} \quad 2.7$$

Onde:

$MATD$  - Média anual do tráfego diário (considerar nº de faixas por via);

$L$  - Comprimento da zona afetada pela queda de blocos (m);

$DVD$  - Distância de visão (m);

$V$  - Velocidade de circulação (km/h);

$DP$  - Distância de paragem;

$a$  - Máximo valor de  $DVD$  e  $DP$  ou 0 quando ultrapassa o valor destas.

Posto isto, o **Risco Total Relativo (RTR)** obtém-se da seguinte forma:

- Se  $FS \leq 1$  então, **RTR=1**;
- Se  $FS > 1$  então, **RTR = FG×FS×FEH**.

Após aplicadas as medidas de remediação, o RTR passa a designar-se por Risco Residual (RR) e a redução do risco pode ser calculada através da diferença entre os RTR's antes e depois de aplicadas as técnicas de remediação – equações 2.8 e 2.9.

$$\text{Redução do risco} = \text{RTR}_{\text{antes}} - \text{RTR}_{\text{depois}} \quad 2.8$$

Ou seja:

$$\text{Redução do risco} = \text{RTR} - \text{RR} \quad 2.9$$

A determinação da redução do risco permite, de certa forma, avaliar a relação custo/benefício para cada medida de reabilitação, permitindo, selecionar as soluções de remediação mais eficazes para cada caso (Darrow et al., 2009).

- ***Unstable Slope Management System (USMS), Washington - (WSDOT)***

É um sistema muito utilizado na gestão do risco, desenvolvido pelo Departamento de Transportes de Washington (WSDOT), EUA, em 1993. Prioriza taludes instáveis, tanto naturais como artificiais, quer em solos quer em maciços rochosos. Numa primeira fase, pretende-se identificar os fatores que determinam os mecanismos de rotura do talude e, numa segunda fase, arquivá-los ou analisá-los por forma a que sejam implementadas as medidas de remediação para os taludes que evidenciem risco para a via, para os veículos e para as zonas envolventes (Carlton & Norton, 1991).

O processo de análise divide os taludes localizados em vias mais e menos importantes consoante o respetivo tráfego médio diário - TMD. Assim, para vias consideradas mais importantes ( $\text{TMD} > 40\,000$ ), a análise é feita com base em onze critérios, cuja pontuação varia entre 3 e 81 pontos, e cuja pontuação final se encontra entre 33 e 891 pontos, sendo o valor mais elevado representativo do maior risco para a via.

Para vias consideradas menos importantes, com TMD máximo  $\geq 5000$  e, que representem sinais de risco, a análise é estabelecida segundo oito critérios diferentes - Tabela do ANEXO D. Esta avaliação é realizada segundo o sistema de classificação ***Risk Reduction Rock Slope Scaling*** - RRRSS, que foi elaborado com o intuito de reduzir o risco dos taludes rochosos, em vias de menor importância, de forma mais económica, regularizando a sua face através de técnicas manuais e, conseqüentemente, reduzir os custos envolvidos na manutenção. Uma pontuação final  $\geq 250$  pressupõe que o talude seja analisado por técnicos especializados na área de forma mais detalhada (WSDOT, 2010).

Os taludes que se encontrem em vias principais ou que liguem estados são priorizados para remediação, seguidos dos taludes em vias com menor tráfego, ordenando-os de forma descendente, sendo a manutenção priorizada para aqueles cujo risco é considerado elevado.

Dadas as limitações orçamentais, a manutenção de taludes instáveis envolve uma análise de custo-benefício. Esta relação obtém-se pelo quociente dos custos de manutenção estimados para um período de 20 anos pelos custos de reparação permanente (Darrow et al., 2009). Assim,

sempre que a relação custo-benefício for  $> 1$  e a pontuação final for de pelo menos 350, o talude será considerado de manutenção prioritária a fim de evitar possíveis acidentes/incidentes.

- **CRHRS, e suas alterações, Colorado - (CDOT)**

Com o propósito de solucionar algumas questões que teriam sido levantadas pelo Departamento dos Transportes do Colorado (CDOT), relativamente ao RHRS de ODOT, foram efetuadas algumas modificações a esse sistema de classificação. Algumas das questões que o CDOT considerou como fraquezas da referida classificação e necessidades de revisão foram (Santi et al., 2008):

- i. A subjetividade na terminologia de alguns critérios, não permitindo um consenso na avaliação dos taludes por diferentes técnicos;
- ii. Algumas características geológicas e climáticas, que não constam da classificação, apesar de constituírem um contributo no desencadeamento de movimentos de massa;
- iii. O sistema não isola os fatores de perigo dos fatores de risco;
- iv. A existência de apenas dois critérios que descrevem as condições geológicas do talude.

Em 1994 foi avançada uma versão que incluía fatores que caracterizavam o talude, como a sua altura, inclinação, continuidade e ainda o comprimento do segmento afetado. Algumas das alterações sugeridas abrangiam os fatores geológicos, passando a considerar-se os seguintes casos:

- a) **Caso I:** para taludes cujas descontinuidades do maciço rochoso são as principais desencadeadoras do movimento, considera-se a respetiva persistência, orientação e a resistência ao corte;
- b) **Caso II:** para taludes em que a erosão é o principal responsável pelo movimento, considera-se a diferença das taxas de erosão dos materiais que o compõem.

Em ambos os casos, considera-se o tamanho dos blocos ou o volume de material instabilizado após o movimento. Outras das adaptações efetuadas relacionam-se com as condições climáticas e o historial de queda de blocos; designadamente:

- a) **Clima e presença de água no talude:** consideram-se os ciclos de gelo-degelo e acresce-se a duração da presença de água no talude;
- b) **Historial de ocorrências:** baseia-se na observação efetuada aquando das operações de manutenção (Santi et al., 2008).



Considera-se, ainda, o número de acidentes de trânsito ocorridos devido à queda de blocos nos diferentes segmentos da via.

Em 1997 este sistema foi modificado, passando a integrar a vala de captação, a distância de visibilidade de decisão e o tráfego médio diário. Contudo, este último fator foi substituído, em 2001, pelo risco médio para veículos – Tabelas D.4 e D.5 do ANEXO D (Santi et al., 2008).

- **TRHRS, Tennessee - (TDOT)**

Para que fosse possível obter uma repetibilidade e consistência entre os diferentes técnicos que recorressem ao RHRS, o Departamento dos Transportes do Tennessee - TDOT, propôs um sistema, denominado de *Tennessee Rockfall Hazard Rating System* – TRHRS, também este baseado no sistema classificativo proposto pelo ODOT, e que visa uma descrição mais explícita dos parâmetros geológicos envolvidos nos diferentes tipos de mecanismos de rotura. Este sistema requer duas etapas, consideradas fundamentais na avaliação do risco de queda de blocos (Darrow et al., 2009):

- Classificação preliminar e inventário dos taludes existentes:** numa primeira fase os taludes são classificados consoante o nível de perigo que representam de acordo com uma escala que se divide em três classes: A (perigo elevado), B (perigo moderado) e C (perigo baixo). Em seguida, os taludes que se inserem nos dois primeiros níveis são reavaliado, e os que se inserem na classe C não são considerados para o estudo (Darrow et al., 2009).
- Classificação detalhada dos taludes que se inserem na classe A:** procede-se à recolha de dados necessários para aplicação do TRHRS, e de acordo com a pontuação obtida é definida a priorização do talude (Darrow et al., 2009).

O TRHRS considera cinco tipos de mecanismos diferentes: **a)** rotura planar, **b)** rotura em cunha, **c)** tombamento, **d)** meteorização diferencial e **e)** desagregação, combinando as seis características mais apropriadas a cada mecanismo (Vandewater et al., 2005).

Algumas das reformulações realizadas neste sistema compreendem, principalmente, as características geológicas. Este pondera todos os mecanismos de rotura, com as respetivas pontuações e, soma-os, ao invés de considerar apenas o valor obtido para o tipo de rotura com maior probabilidade de ocorrência. Os tipos de rotura controlados estruturalmente são: a rotura planar, em cunha ou tombamento, enquanto que os tipos de rotura controlados pela meteorização são distinguidos em: meteorização diferencial e desagregação.

As características pertinentes para os tipos de rotura são: a abundância relativa na zona de rotura, definida como a percentagem do total da área do talude de escavação e a dimensão dos blocos, representada pela maior dimensão dos mesmos. As características particulares da rotura planar ou em cunha são a inclinação máxima da superfície de rotura e os perfis de rugosidade

da mesma. A quantidade de blocos em consola é uma característica particular da erosão diferencial e a forma dos blocos é específica para a desagregação (Darrow et al., 2009).

Relativamente à pontuação atribuída a cada característica, esta pode variar em relação ao RHRS original, sendo essa pontuação (3, 9, 27,81) atribuída apenas a critérios cuja medição é obtida diretamente, como por exemplo o tamanho e a forma dos blocos (para rotura planar e em cunha). Caso contrário, as pontuações utilizadas são 2, 5, 24 e 41 para o caso da inclinação e perfis de rugosidade (para rotura planar), ou 5, 14, 41 e 122 para as características envolvidas no mecanismo de rotura por tombamento. Os critérios considerados neste sistema sumarizam-se na Tabela D.6, Tabela D.7 e Figura D.1 do ANEXO D.

- **ODOT II, Oregon - (ODOT II)**

Em 2001 um novo sistema foi implementado pelo ODOT, proveniente da adaptação do antigo, para que fosse aplicado a todo tipo de instabilidades que pudessem vir a ser identificadas nos taludes. Este novo sistema inclui três grupos de parâmetros:

- a) Avaliação do perigo:
  - i. Perigo de rotura;
  - ii. Impacto na rodovia;
  - iii. Frequência anual de manutenção;
  - iv. Tráfego médio diário;
  - v. Histórico de acidentes no trânsito;
- b) Fator custo-benefício;
- c) Fator de classificação da via.

Cada um dos cinco critérios listados no primeiro parâmetro (*Avaliação do perigo*) apresenta uma pontuação máxima de 100 pontos, pelo que o valor máximo a obter para este fator é de 500. Após pontuados, os critérios são somados e, posteriormente, multiplicados pelos restantes fatores - *Fator custo-benefício* e *Fator de classificação da via*.

O *Fator custo-benefício* é obtido pelo quociente entre os custos de manutenção durante vinte anos pelos custos de reparação permanente, este valor varia entre 0,5 e 1,5. Para valores de custo-benefício inferiores a 0,5 não haverá financiamento para reparações permanentes, uma vez que estas representariam o dobro dos custos de manutenção. Relativamente ao valor máximo (1,5), este indica que os custos de manutenção durante 20 anos representam o dobro dos custos de reparação permanente.

Relativamente ao *Fator de classificação da via*, categoriza a via pelo tipo e importância, isto é, prioriza as vias principais, com maior afluência de tráfego. Os critérios e respectivas pontuações para aplicação deste sistema incluem as Tabelas D.8 a D.10 do ANEXO D.

- **Utah - (UDOT)**

O Departamento dos Transportes do Utah (UDOT), adotou o sistema de NYSDOT, já referido, por considerá-lo o mais realista no que respeita à análise do risco associado aos taludes com evidências de movimentos de massa. Contudo, esta adoção não foi total, tendo sido efetuadas as seguintes alterações às características geológicas (Darrow et al., 2009):

- a) O fator geológico passa a ser calculado segundo a equação 2.10:

$$FG = \text{Geologia} + 2 \times \text{Tamanho}_{\text{blocos}} + \text{Fricção}_{\text{rocha}} + \text{Água} + 2 \times \text{Histórico} + \text{Altura acima da crista} \quad 2.10$$

- b) Na categoria *Geology (Sedimentary)*, o termo foi substituído por *Geology (Layered)*, para eliminar a conotação de origem geológica.

O cálculo do Risco Total Relativo (RTR) mantém-se igual ao proposto pelo sistema de NYSDOT.

- **MORH RS, Missouri – (MDOT)**

O Departamento dos Transportes de Missouri (MDOT) desenvolveu um sistema, designado de *Missouri Rockfall Hazard Rating System* - MORH RS, que analisa taludes rochosos de rodovias, e que pretende avaliar a prioridade e necessidade de manutenção de cada talude da forma mais rentável possível. Os fatores de risco e as consequências são tratados isoladamente, permitindo, assim, dar ênfase a taludes cujos níveis destes critérios sejam considerados elevados e, assim, reduzir os danos causados na via pública, em veículos, nas áreas adjacentes e ainda atrasos no tráfego (Youssef et al., 2003).

São considerados 22 fatores, dos quais nove analisam o risco, dez as consequências e três são de ajuste para os anteriormente referidos. Numa primeira etapa pretende-se identificar potenciais problemas em taludes rochosos através de *mobile digital vídeo logging*, caracterizar e priorizar as medidas de remediação a adotar - Tabelas D.11 e D.12 do ANEXO D.

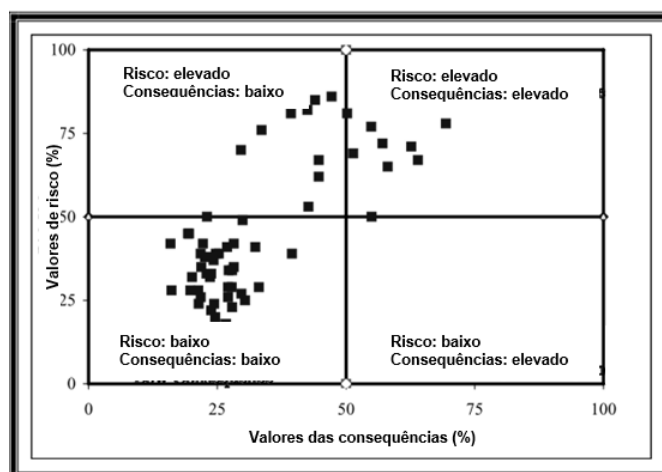
Na etapa seguinte avaliam-se três tipos de parâmetros: os que são inerentes ao próprio talude (altura, ângulo, capacidade da vala e tamanho dos blocos), fatores externos que afetam o talude (condições climáticas e presença de água) e, por fim, fatores inerentes à via (tráfego médio diário e risco médio para o veículo). Com ambas as etapas procede-se à análise detalhada e ao planeamento das metodologias de remediação finais mais adequadas a cada caso (Youssef et al., 2003).

Após a recolha de dados e a atribuição da respetiva pontuação, as classificações, tanto do risco, como das consequências – Tabelas D.13 e D.14 do ANEXO D, são também elas obtidas isoladamente, isto é, as pontuações dos critérios de cada uma são somadas e divididas pelo total máximo de cada fator, e depois multiplicados por cem, de modo a que o resultado seja dado em percentagem. Os fatores de ajuste são somados posteriormente, não entrando na média de cálculo, tal como apresentado nas equações 2.11 e 2.12 (Youssef et al., 2003).

$$\frac{\sum \text{Pontuações dos diferentes critérios do risco}}{\text{Pontuação máxima total obtida para o risco} = 96} + \text{Fatores de ajuste} \quad 2.11$$

$$\frac{\sum \text{Pontuações dos diferentes critérios das consequências}}{\text{Pontuação máxima total obtida para o risco} = 96} + \text{Fatores de ajuste} \quad 2.12$$

Os resultados finais de cada um dos critérios são apresentados sob forma de um gráfico de dispersão, onde os intervalos de variação, tanto para o risco (eixo das ordenadas) como para as consequências (eixo das abcissas), estão compreendidos entre 0 e 100. Os valores > 50% são considerados elevados e, por isso o talude é priorizado para a aplicação de medidas de remediação.



Estudo realizado na Highway 65 - troço entre Springfield e Branson, Missouri

*Youssef et al., 2003*

**Figura 2.3 – Exemplo de um diagrama Consequência vs. Risco para taludes com diferentes níveis de perigo**

- **mRHRS**

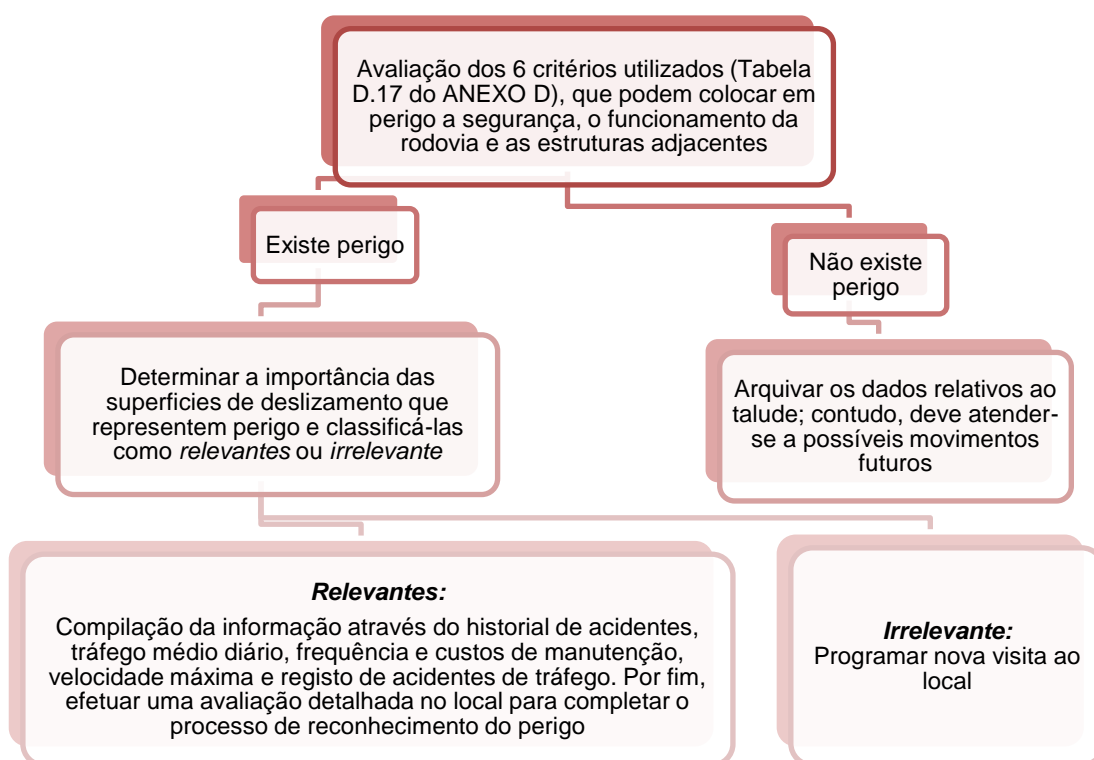
Budetta & Panico (2002) efetuaram algumas modificações ao RHRS (Pierson et al. 1990;1993), adaptando-o a um caso de estudo no sul de Itália. Estas alterações foram realizadas devido à subjetividade de alguns critérios que compõem aquele sistema classificativo. No entanto, Budetta (2004) terá verificado algumas limitações na sua aplicação, que mantinham ainda alguma da

subjetividade anteriormente verificada. O *modified* RHRS (mRHRS) – Tabelas D.15 e D.16 do ANEXO D, apresenta algumas modificações, principalmente, no cálculo individual de alguns critérios. Tais alterações encontram-se devidamente caracterizadas em Costa (2015).

- **Ohio - (OHDOT)**

Em 2007 o Departamento dos Transportes de Ohio (OHDOT) elaborou um sistema de classificação que avalia seis fatores – Tabela D.17 do ANEXO D, que representam o risco de ocorrência de movimentos de massa e que, por conseguinte, provocariam um impacto negativo na segurança e utilização da rodovia, bem como nas estruturas adjacentes.

Cada um dos fatores é classificado de acordo com o sistema RHRS desenvolvido pelo estado de *Oregon*, anteriormente referido. À semelhança do que acontece nos outros sistemas, as pontuações 3, 9, 27 e 81 indicam as condições que cada fator poderá vir a apresentar. O diagrama da Figura 2.4 mostra as etapas de reconhecimento do perigo que um dado movimento de massa representa num determinado talude (Darrow et al., 2009).



**Figura 2.4 - Diagrama representativo das etapas a adotar pelo sistema sugerido pelo OHDOT**

- **Unstable Slope Management Program (USMP), Alasca - AKDOT&PF**

Com o intuito de inventariar e avaliar taludes instáveis em estruturas viárias, o Departamento dos Transportes do Alasca e Instalações Públicas - AKDOT&PF, sugeriu um sistema de classificação,

*Unstable Slope Management Program* (USMP), semelhante ao RHRS. É um sistema que se aplica tanto a taludes em rocha como em solos, inclusivamente aterros, com base em critérios pontuados à semelhança do sistema original de ODOT. A particularidade que este sistema apresenta é a introdução dos critérios gelo (*frozen*) e degelo (*unfrozen*), na componente dos solos, que se refere à presença de água no estado sólido. Este é um critério que surge em consequência das condições climáticas que o estado apresenta sazonalmente em algumas zonas, nomeadamente no período de inverno (Darrow et al., 2009).

O USMP desenvolve-se em três fases: uma preliminar, outra para a avaliação do perigo e outra para a avaliação do risco. Na fase preliminar, os taludes são classificados segundo três classes - Tabela 2.12, que permitem priorizar taludes instáveis fundamentadas em três parâmetros: a eficácia da vala o impacto no tráfego e o “historial” de acidentes no tráfego ou potenciais. Contudo, nesta fase existe uma distinção - caso o talude apresente evidências de movimentos anteriores é então necessário entrar com o fator historial de atividade geológica. Assim sendo, as classes de priorização diferem entre taludes que evidenciem movimentos anteriores -Tabela 2.12 dos que representam potencial risco destes virem a ocorrer -Tabela 2.13 (Darrow et al., 2009).

**Tabela 2.12 - Classes de priorização para taludes com evidências de movimentos anteriores**

Classe	Pontuações	Descrição
<b>A</b>	≥108	Probabilidade de rotura moderada a elevada provocando impacto na via
<b>B</b>	12 a 108	Probabilidade de rotura baixa a moderada e o impacto na via é reduzido
<b>Irrelevante</b>	≤12	Baixa probabilidade de rotura. Caso ocorra a rotura o impacto na via é quase nulo

*adaptado de Darrow et al., 2009*

**Tabela 2.13 - Classes de priorização de taludes sem evidências de movimentos anteriores**

Classe	Pontuações	Descrição
<b>A</b>	≥162	Probabilidade de rotura moderada a elevada provocando impacto na via
<b>B</b>	54 a 162	Probabilidade de rotura baixa a moderada e o impacto na via é reduzido
<b>Irrelevante</b>	≤54	Baixa probabilidade de rotura. Impacto da rotura na via é quase nulo

*adaptado de Darrow et al., 2009*

Taludes classificados nas classes A ou B passam para a fase seguinte, a avaliação do perigo. Esta descreve a probabilidade do material envolvido no movimento de massa atingir a via. Os fatores e as respetivas pontuações envolvidos nesta avaliação encontram-se nas Tabelas D.18 a D.20 do ANEXO D. Após a análise dos fatores e, atribuída a devida pontuação, calcula-se o

valor total e, consoante o perigo que o talude represente para a via, é-lhe atribuído um nível - Tabela 2.14 e Tabela 2.15 (Darrow et al., 2009).

**Tabela 2.14 - Nível de perigo para taludes em solo ou rocha**

Nível de perigo	Pontuações
I	≤21
II	21 a 63
III	62 a 189
IV	188 a 567

*Darrow et al., 2009*

**Tabela 2.15 – Nível de perigo para aterros**

Nível de perigo	Pontuações
I	≤18
II	18 a 54
III	53 a 162
IV	161 a 486

*Darrow et al., 2009*

Finalmente, efetua-se a avaliação do risco que descreve o grau de um determinado movimento afetar os utentes. Para além do impacto no tráfego, do tráfego médio diário, do risco médio para o veículo, da distância de visibilidade de decisão, da frequência e dos custos de manutenção, esta avaliação envolve os níveis de perigo obtidos na fase anterior. Posto isto, em conjunto com o departamento de Manutenção & Operações (M&O), determina-se a relevância da informação obtida com as análises de modo a aplicar, ou não, as medidas de mitigação ou remediação do talude em estudo (Darrow et al., 2009).

- **RHRON, Ontário - MTO**

Devido à presença de taludes de menor altura, cuja sua instabilização é principalmente causada pela ação do gelo-degelo, o Ministério dos Transportes de Ontário, Canadá, efetuou também algumas alterações à versão original do RHRS. A nova classificação, o *Rockfall Hazard Rating System for Ontario* – RHRON, divide os parâmetros em quatro categorias (Santi et al., 2008):

- **Magnitude:** descreve a quantidade de material esperada na consequência do movimento de massa. Avalia, ainda, a altura da massa instável e o volume de material solto no talude;
- **Instabilidade:** descreve a estabilidade do talude, baseada no tipo de roturas que ocorrem frequentemente. Classifica-se a partir do material solto na face do talude e a sua irregularidade, o nível de água, o tamanho do bloco, a resistência à compressão da

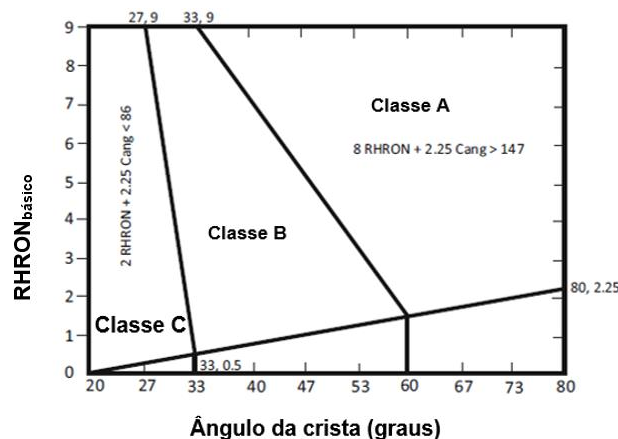
rocha, o índice de durabilidade, o espaçamento, a orientação e a persistência das descontinuidades;

- **Alcance:** descreve a probabilidade dos blocos alcançarem a via após o evento. Obtém-se através do cálculo da altura do talude em relação à altura da vala, manutenção da mesma e a área da via suscetível de ser afetada pelo movimento de massa;
- **Consequências:** com base no tráfego médio diário, o comprimento do talude, a largura da via e a distância de decisão, este parâmetro descreve o risco para o tráfego após o evento.

Cada um destes critérios é classificado numa escala compreendida entre 0 (bom) e 9 (mau). A média dos quatro critérios permite calcular o  $RHRON_{básico}$  de acordo com a expressão 2.13, também ele variando entre 0 e 9. O  $RHRON_{básico}$ , juntamente com o ângulo do talude, permite obter um nível de perigo que se subdivide em três classes (A,B e C):

$$RHRON_{básico} = \frac{F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV}}{4} \quad 2.13$$

- **Classe A:** taludes com ângulo  $>60^\circ$ , representam perigo elevado de queda de blocos e, que necessitam de análises detalhadas;
- **Classe B:** taludes em zonas com perigo moderado de queda de blocos, cujo ângulo varie entre 33 e  $60^\circ$ , geralmente os taludes não necessitam de análises detalhadas;
- **Classe C:** taludes localizados em zonas com baixo perigo de queda de blocos e que apresentam ângulos  $<33^\circ$ . Não há probabilidade das instabilidades afetarem a rodovia.



*Franklin et al., 2012*

**Figura 2.5 - Gráfico para determinação da classe de perigosidade em função do ângulo do talude e o  $RHRON_{básico}$**



Nas zonas cujos taludes necessitem de análises detalhadas, efetua-se a identificação do mecanismo de instabilização potencial e aplica-se o sistema de classificação RHRSN, em seguida sugerem-se medidas de remediação. Para tal, a zona identificada com classe A deve ser dividida em diferentes níveis de perigo, e aquele que apresentar um nível mais elevado é aquele à qual é aplicada a análise detalhada – Tabelas D.21 e D.22 e Figura D.2 do ANEXO D (Liang et al., 2006).

- **RHRSm2**

Recentemente, Pinheiro et al. (2014) terão proposto algumas alterações ao mRHRS, de modo a que a sua aplicação seja mais simples. As alterações propostas por estes autores consistem na modificação ou adição de novos critérios que se encontram sucintamente descritos em Costa (2015), que também apresenta um exemplo de aplicação prática. A Tabela D.23 do ANEXO D lista os critérios considerados neste sistema, bem como as respetivas pontuações.

- **Slope Quality Index (SQI)**

O SQI é uma classificação que pretende atribuir, tal como o nome indica, um índice de qualidade para taludes rochosos em infraestruturas rodoviárias. Este índice permite ainda avaliar as condições do talude e o nível de risco que lhe está associado. Baseia-se em nove fatores que contemplam a avaliação de parâmetros internos e externos relacionados com a qualidade e estabilidade de taludes, como representado na Tabela 2.16. Cada um dos fatores é classificado pelo seu grau de importância e influência através da atribuição de pesos, que se encontra não só especificamente descrito, como aplicado em Costa (2015). Estes fatores e respetivas pontuações encontram-se na Tabela D.24 do ANEXO D.

**Tabela 2.16 - Fatores e parâmetros considerados na classificação SQI**

<b>Fatores</b>	<b>Parâmetros</b>
<b>Geométrico</b>	Altura e inclinação do talude; largura e ângulo das banquetas
<b>Geológico</b>	Classificações empíricas (RMR, SMR ou Q); tipo de formação e risco de queda de blocos (RHRSm2)
<b>Sistema de drenagem</b>	Sistema de drenagem superficial e profunda
<b>Inspeções visuais</b>	Avaliação do estado de manutenção e conservação
<b>Monitorização</b>	Resultados dos sistemas de monitorização: inclinómetros, marcas superficiais, piezómetros, etc.
<b>Histórico</b>	Histórico de acidentes no talude e intervenções
<b>Ambiente / tráfego</b>	Zona sísmica, precipitação e intensidade de tráfego
<b>Proteções</b>	Proteções superficiais (redes metálicas, pregagens, etc.) e coberto vegetal
<b>Imediações</b>	Existência de sobrecargas e possíveis vibrações

*Pinheiro et al., 2015 in Costa, 2015*

- **Classificação adotada no caso de estudo**

Após o estudo e análise aos diferentes sistemas de classificação de risco, aplicados a taludes em rodovias, optou-se, para utilização no presente estudo, pelo sistema de classificação USMS na avaliação do risco de taludes de escavação em ferrovias. Este é um sistema vantajoso e diversificado, na medida em que se aplica a um vasto leque de condições estruturais e geológicas. É possível verificar que os fundamentos principais adotados neste sistema são: as causas de instabilização, a utilização da via, os custos de reparação e a segurança do condutor, pelo que apresenta algumas vantagens; nomeadamente:

- i. Aplica-se a taludes naturais ou artificiais, tanto em solos, como em maciços rochosos;
- ii. Aplica-se a taludes com diferentes tipos de instabilização: queda de blocos, deslizamentos, fenómenos de alteração e assentamentos;
- iii. Prioriza os taludes instáveis, com base em inventários e numa análise custo-benefício, de modo a que seja possível a sua manutenção;
- iv. É uma classificação que envolve fatores relacionados com as características do talude, da via e de fatores económicos, permitindo uma análise mais sólida.

De forma a entender este sistema classificativo e a sua aplicabilidade no caso presente, descrevem-se os critérios e respetivas pontuações para as vias de maior tráfego e, consequentemente, de maior importância, visto estudar-se uma ferrovia, o que implica que esta seja uma via de maior importância por ligar diferentes locais do país, bem como locais entre diferentes países. Assim, os onze critérios que analisam o risco do talude para vias de maior tráfego - Tabela 2.17, incluem (Macdonald, 2006):

- i. **Tipo de problema**

- a) *Solo*: condição aplicada a taludes de aterro ou solos, e inclui os mecanismos de erosão do talude, os assentamentos, os movimentos de massa e o fluxo de detritos;
- b) *Maciço rochoso*: condição aplicada a taludes exclusivamente afetados pela queda de blocos, avaliando a capacidade de captação da vala;
- ii. **Tráfego médio diário (TMD)**: classifica o tráfego médio diário no segmento afetado pela instabilidade do talude.
- iii. **Distância de visibilidade de decisão (DVD) (%)**: distância mínima necessária para um condutor identificar o perigo, decidir rapidamente e responder da melhor forma à ocorrência. É dada pelo rácio da percentagem da distância de visibilidade atual e a distância de visibilidade de decisão.

- iv. **Impacto da rotura na rodovia:** característica relacionada com o comprimento da rotura atual medida em campo ao longo da rodovia.
- v. **Impedância da rodovia:** classifica a impedância do tráfego devido à rotura no talude instável. Baseia-se na largura do impacto na rodovia.
- vi. **Risco médio para o veículo (RMV):** mede a probabilidade do veículo estar na área afetada pelo talude instável. Este valor pode ser > 100%, o que significa que poderá existir mais do que um veículo na área afetada.
- vii. **Danos no pavimento:** avalia os diferentes danos que podem ser causados na rodovia, devido à rotura do talude. Considera se o condutor consegue contornar o obstáculo à velocidade limite imposta na via de circulação.
- viii. **Frequência de rotura:** sumariza a frequência de rotura de um talude instável.
- ix. **Custos anuais de manutenção:** referem-se aos custos anuais de manutenção necessários despendidos com o talude instável.
- x. **Acidentes no tráfego nos últimos 10 anos:** refere-se ao número de acidentes no tráfego, nos últimos dez anos, causados pela instabilidade do talude.
- xi. **Fator económico:** avalia os potenciais impactos económicos caso a rodovia se encontre encerrada ou impedida. Baseia-se no comprimento dos desvios da zona afetada. Os fatores como as condições de desvio do tráfego e a respetiva intensidade do tráfego devem ser considerados na escolha do desvio a implementar.

**Tabela 2.17 - Critérios de classificação adaptados no USMS**

<b>Critérios</b>	<b>3 Pontos</b>	<b>9 Pontos</b>	<b>27 Pontos</b>	<b>81 Pontos</b>
<b>Tipo: Solo</b>	Erosão do talude de aterro ou escavação	Assentamentos ou erosão interna	Movimentos lentos	Movimentos rápidos ou torrentes de detritos
<b>Tipo: Maciço rochoso</b>	Boa captação de blocos de menores dimensões	Captação moderada para blocos de média dimensão	Captação limitada para blocos de maior dimensão	Sem captação para blocos de maior dimensão
<b>Tráfego médio diário</b>	<5000	5000 a 20000	20000 a 40000	>40000
<b>Distância de visibilidade decisão</b>	Distância de visibilidade adequada	Distância de visibilidade moderada	Distância de visibilidade limitada	Distância de visibilidade muito limitada

**Tabela 2.17 - Critérios de classificação adaptados no USMS (continuação)**

<b>Critérios</b>	<b>3 Pontos</b>	<b>9 Pontos</b>	<b>27 Pontos</b>	<b>81 Pontos</b>
<b>Impacto da rotura na rodovia</b>	<15m	15 a 60m	60 a 150m	>150m
<b>Impedância da rodovia</b>	Berma	½ da rodovia	¾ da rodovia	Toda a rodovia
<b>Risco médio do veículo</b>	<25% das vezes	25 a 50% das vezes	50 a 75% das vezes	>75% das vezes
<b>Danos na plataforma</b>	Reduzidos – não detetável	Moderados- o condutor deve abrandar	Elevados - o condutor deve parar	Extremos- não contornável
<b>Frequência de rotura</b>	Sem rotura nos últimos 5 anos	1 vez nos últimos 5 anos	1 vez por ano	Mais do que uma vez por ano
<b>Custos de manutenção/ano</b>	< 4550€	4550€ a 9100€	9100€ a 45.500€	>45.500€
<b>Fator económico</b>	Não requer desvios	Desvios curtos < 4,83 km	Desvios longos > 4,83 km	Acesso único- sem desvios
<b>Acidentes nos últimos 10 anos</b>	0 a 1	2 a 3	4 a 5	>5

*adaptado de WSDOT, 2010*

## **2.4 Medidas de mitigação em taludes rochosos**

Devido à impossibilidade de prever exatamente a ocorrência de um movimento instabilizador e, assim, ter consequências catastróficas, a aplicação de medidas de mitigação passou a ser uma prática recorrente no que respeita a obras geotécnicas. As medidas de mitigação aqui expostas visam apresentar soluções a fim de eliminar, ou diminuir para níveis aceitáveis, o risco associado a um determinado evento de instabilidade num talude rochoso.




Nas secções que se seguem, abordam-se as técnicas mais recorrentes na estabilização de taludes rochosos, como é o caso do reperfilamento ou redimensionamento da geometria do talude, a integração ou o melhoramento de sistemas de drenagem e, ainda, a incorporação de geossintéticos com diferentes funções, tendo como base o tipo de terreno, os mecanismos de rotura e os fatores geológicos (AGS, 2007a).

### **2.4.1 Reperfilamento**

É uma medida de redução do risco, aplicada quando este é considerado baixo, ou muito baixo. Trata-se de um processo de terraplenagem através do qual se efetuam alterações à morfologia do talude, ou remoção de blocos soltos, cujo objetivo é a sua estabilização através da diminuição

da inclinação e redistribuição das forças originadas pelo peso do terreno, Tabela 2.18. Devido à sua simplicidade, eficácia e baixo custo esta é uma intervenção muito utilizada (AGS, 2007a).

**Tabela 2.18 – Técnicas de reperfilamento aplicáveis a taludes rochosos**

<b>Técnicas de reperfilamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplo</b>
<b>Banquetas</b>	Aplica-se a taludes com inclinações acentuadas, conferindo-lhes um perfil em socacos. Cada banquetta deve ter um sistema de drenagem associado de forma a escoar a água para uma zona de descarga. Esta técnica permite ainda reduzir a velocidade dos blocos durante a sua queda, reduzindo o seu impacto na via.	
<b>Regularização/ Saneamento</b>	Consiste na limpeza do talude, isto é, na remoção de blocos soltos, fragmentos de rocha degradada e possível presença de vegetação na face do talude. Esta é uma medida pouco dispendiosa que recorre a ferramentas manuais como pás, serras ou jatos de água a pressões elevadas, retirando assim as arestas mais evidentes e que possam induzir potenciais quedas de blocos ou movimentos de massa.	 <i>WSDOT, 2010</i>
<b>Adoçamento do perfil</b>	Técnica de redução da inclinação total ou parcial do talude.	




## 2.4.2 Reforço

Geralmente as técnicas de reforço são as mais comuns em taludes rochosos e recorrem a obras que envolvem estruturas metálicas, betão projetado e, em alguns casos, complementam-se com geossintéticos - Tabela 2.19.

Esta técnica visa aumentar a resistência ao corte do terreno na potencial superfície de rotura através da introdução de: **a)** elementos que melhoram a resistência do terreno na potencial superfície de rotura ou **b)** elementos que aumentam as forças tangenciais entre as potenciais superfícies de rotura (Vallejo et al., 2004). Por ser uma técnica que pode envolver estruturas metálicas, é importante que estas sejam de aço inoxidável evitando a sua corrosão e detioração.

Para a aplicação desta técnica é crucial ter alguns aspetos em conta, como as características geológicas e geotécnicas do maciço, o tipo de danos que este apresenta, a finalidade da obra, os custos de manutenção e o tempo disponível, para que a técnica adotada seja a mais adequada a cada situação de risco (AGS, 2007b).


**Tabela 2.19 – Técnicas de reforço aplicadas em taludes rochosos**

<b>Técnicas de reforço</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplo</b>
<b>Ancoragens passivas</b>	Também denominadas de pregagens, são ativadas com o deslocamento do maciço. Normalmente não têm comprimento livre nem constituição de bolbo de selagem por injeção, sendo geralmente seladas em todo o seu comprimento. Estas não oferecem um suporte ao maciço até que este comece a ceder.	 <p><i>Vallejo et al., 2004</i></p>
<b>Ancoragens ativas</b>	São pré-esforçadas quando colocadas em serviço, limitando a deformação da estrutura e, em alguns casos, recuperando parte da deformação.	
<b>Betão projetado</b>	Utilizado para reforçar as zonas de cisalhamento ou de fraqueza do maciço, prevenindo a queda de blocos de pequenas dimensões. Em muitos dos casos, o betão pode ser reforçado com malhas de arame soldado, com fibras de aço ou polipropileno, para melhorar a sua resistência à tração. Pode ainda ser aplicado como medida de proteção superficial do talude.	
<b>Injeção de permeação</b>	Aplica-se em taludes rochosos para selar ou preencher as fissuras presentes, conferindo estabilidade ao maciço (IITBHU, 2017).	 <p><i>APgeotecnia (2012)</i></p>

### 2.4.3 Proteção

As medidas de proteção são muito solicitadas quando se trata de rodovias e ferrovias por prevenirem a queda de blocos soltos existentes nos taludes das mesmas, protegendo, desta forma, a via, aumentando a segurança perante os diferentes mecanismos de rotura, evitando ou reduzindo a meteorização na face do talude e evitando a percolação de água (aplicação de betão projetado - Tabela 2.19). Nesta técnica recorre-se à aplicação de redes metálicas rígidas ou flexíveis ou valas de captação, tal como descrito na Tabela 2.20.

**Tabela 2.20 – Técnicas de proteção aplicadas em taludes rochosos**

<b>Técnicas de proteção</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplo</b>
<b>Captação</b>	Pode consistir em valas, bermas, barreiras de aço, barreiras dinâmicas e muros de betão/alvenaria. O tipo de captação a utilizar depende das condições do local, especificamente da altura e do ângulo do talude e do espaçamento entre o talude e a via. Quando se trata de ferrovias, aplicar este sistema torna-se complicado, uma vez que nem sempre existe um espaço suficiente entre a via e o talude. Por isso, é necessário instalar este sistema na face do talude (IITBHU, 2017).	 <p><i>Altiplano, 2014</i></p> <p><b>Barreira dinâmica</b></p>
<b>Redes de aço</b>	Ao contrário da técnica de captação, as redes de arames são estáticas e encontram-se suspensas na face do talude, sustentando os blocos em risco de queda, possíveis de desencadear movimentos de massa (IITBHU, 2017). Destas fazem parte as redes de alta resistência que, por norma, são pregadas.	 <p><b>Barreira estática</b></p>

#### 2.4.4 Drenagem

A presença de água é um dos maiores problemas no que toca a obras geotécnicas pois gera fenómenos de instabilização no maciço rochoso, através da sua infiltração e percolação em descontinuidades ou zonas de fraqueza do maciço, corrosão das estruturas metálicas que possam estar nele contidas e pela ação do gelo-degelo, que provoca a expansão e a retração do maciço, podendo desta forma levar à sua desagregação. Perante estes problemas, uma das medidas a que se recorre é a drenagem.

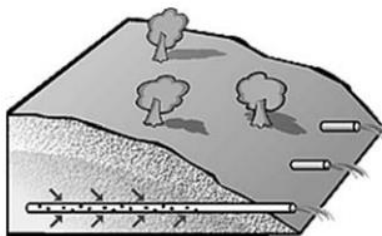
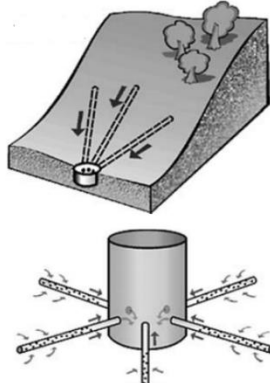
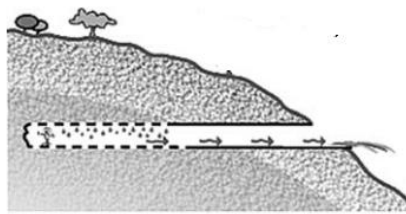
Relativamente aos taludes, esta medida apresenta ainda a vantagem de conferir estabilidade ao reduzir as pressões intersticiais que atuam nas potenciais superfícies de rotura do talude. A presença de água nos taludes pode ser de origem superficial ou subterrânea, sendo o seu controlo geralmente efetuado através da instalação de dispositivos de drenagem superficiais e/ou subterrâneos na face ou no interior do talude, respetivamente.

##### 2.4.4.1 Drenagem profunda

É uma técnica que consiste na remoção de água subterrânea diretamente de uma massa de terreno procedendo à redução da pressão hidrostática. É a técnica mais utilizada no que respeita

a taludes rochosos, muito alterados ou fraturados, com indícios de instabilização (Vallejo et al., 2004). O controlo da drenagem subterrânea é geralmente conseguido através da instalação de uma rede de drenos horizontais e/ou verticais conforme apresentado na Tabela 2.21.

**Tabela 2.21 – Descrição e exemplificação do sistemas de drenagem profunda**

Sistemas de drenagem	Aplicações	Exemplo
<b>Furos drenantes e drenos sub-horizontais</b>	São aplicados na redução de pressões intersticiais numa dada área, no esgotamento de bolsas de água e rebaixamento do nível freático.	 <p><i>Silva, 2016</i></p>
<b>Drenos «californianos»</b>	São drenos horizontais com diâmetro variável de 100 a 150mm, muito eficazes na evacuação da água na zona do sopé do talude. Podem atingir, longitudinalmente, 30 a 40m (Vallejo et al., 2004).	
<b>Drenos radiais</b>	São obras de drenagem que funcionam por gravidade ou bombagem, geralmente associados a poços de alívio nos solos de cobertura do maciço rochoso. O rebaixamento do nível de água é limitado ao necessário assegurando a execução dos trabalhos durante a fase de obra, podendo, em alguns casos, ser definitivas.	 <p><i>Silva, 2016</i></p>
<b>Galerias</b>	Apesar de ser uma medida dispendiosa, as galerias são selecionadas para favorecer a estabilização de escavações e taludes naturais, procurando intercetar as águas subterrâneas, reduzir os níveis de água no subsolo, bem como a pressão intersticial no terreno. Podem ter furos e poços associados para aumentar a sua eficácia.	 <p><i>Silva, 2016</i></p>



#### 2.4.4.2 Drenagem superficial

É uma técnica que visa remover a água da crista e do sopé do talude, de modo a evitar/minimizar potenciais movimentos de massa e, reduzir a infiltração ou fenómenos de erosão ao longo de uma massa potencialmente instável. Permite, ainda, evitar o acesso da água às estruturas viárias



e estruturas localizadas na sua zona envolvente. Na Tabela 2.22 descrevem-se os sistemas de drenagem superficial, bem como a sua aplicação e exemplificação.

**Tabela 2.22– Descrição e exemplificação do sistemas de drenagem superficial**

Sistemas de drenagem	Aplicações	Exemplo
<b>Caleiras</b>	Conduatas utilizadas no escoamento da água, apresentam seção aberta e geralmente semicircular.	
<b>Valetas</b>	Construídas ao longo de uma plataforma ou banquetta para recolha e escoamento da água dos taludes e da superfície final de terraplenagem.	
<b>Valetas de crista</b>	Instaladas na aresta superior do talude, de modo a remover a água da mesma.	
<b>Escadas de água</b>	Permite a descida da água da crista do talude para banquetas inferiores ou para a plataforma, com velocidades de escoamento controladas.	

#### 2.4.5 Geossintéticos

Os geossintéticos surgem integrados nas soluções anteriormente descritas, não representando por si só uma solução de remediação ou mitigação nos maciços rochosos. Estes consistem em

tecidos flexíveis, porosos, mas em alguns casos impermeáveis, fabricados pelo Homem, visando integrar várias funções como o reforço, a drenagem, a filtragem, a separação e a proteção. Em alguns casos podem desempenhar várias funções em simultâneo. Estão explicados na Tabela 2.14 os diferentes tipos de geossintéticos e algumas das suas aplicações (Bathurst, 2007).

**Tabela 2.23 – Descrição das funções dos diferentes geossintéticos**

<b>Função</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplos de aplicações</b>	<b>Exemplos</b>
<b>Reforço</b>	Conferem resistência à tração à matriz do solo, proporcionando assim um material estruturalmente mais competente.	Funcionam como reforço de solos	Geotêxtil, geogrelha
<b>Drenagem</b>	Desempenham diferentes funções quando se trata de fluídos: Coletam os fluídos e transportam-nos ao longo dos seus planos. Dissipam a pressão da água na base de aterros de estradas.	Utilizados como drenos nas bermas do pavimento, na base de taludes e em pilares e muros de contenção.	Geotêxtil, georrede, geotubos
<b>Filtragem</b>	Previnem a migração dos solos para as zonas de drenagem, mantendo o fluxo de água no sistema, evitando o arrastamento de partículas sólidas em suspensão nos fluídos.	Zonas em que se verifique erosão do solo por via de fluxo de água.	Geotêxtil
<b>Separação</b>	São colocados entre dois solos de granulometrias distintas impedindo, desta forma, que se misturem ou interpenetrem.	Prevenir que o material do dreno fique contaminado por partículas arrastadas pelas águas de percolação.	Geotêxtil
<b>Proteção</b>	Redistribuição e uniformização de tensões ou de deformações transmitidas ao material protegido.	Colocados sobre os maciços, protegendo-os da ação dos agentes atmosféricos, ou entre dois materiais, evitando que um deles seja danificado pela ação de cargas concentradas.	Geotêxtil, geomembrana, geocélulas

*adaptado de Bathurst, 2007*

### 3. Estudo de caso – Trecho ferroviário Guarda-Vilar Formoso

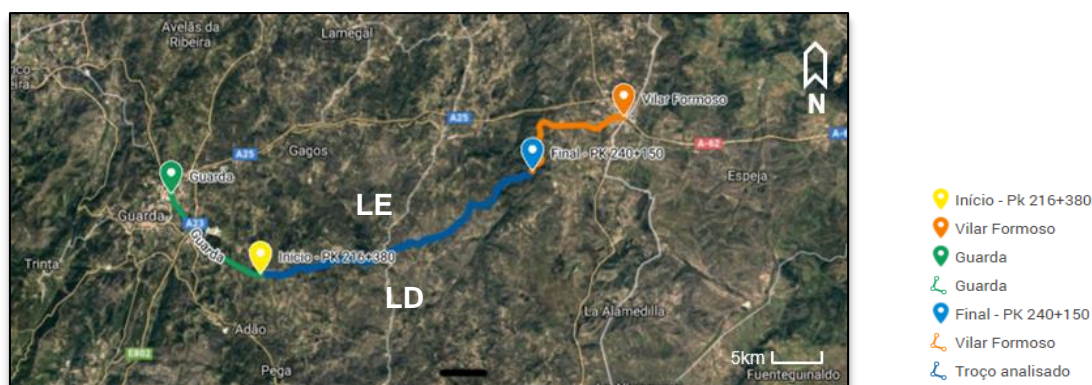
Neste capítulo referem-se os aspetos relacionados com o caso prático de estudo, incluindo o enquadramento da zona, a metodologia adotada no estudo dos taludes, a recolha de dados de campo e a sugestão de algumas soluções de estabilização.

O trecho estudado foi proposto pela empresa TPF Planege Cenor que necessitou de solicitar uma “Ordem de Trabalhos” junto às entidades competentes, para que o trabalho de campo pudesse ser realizado de forma segura. Por um lado, essa “Ordem de Trabalhos” restringia o acesso à ferrovia durante um período de tempo muito limitado e, por outro lado, limitava a velocidade de circulação dos comboios nas zonas onde a equipa de reconhecimento se encontrasse.

#### 3.1 Enquadramento geográfico

Os taludes do caso de estudo situam-se ao longo da linha ferroviária da Beira-Alta, cujo comprimento é de 202 km, fazendo uma extensão da Linha do Norte, que tem início na Pampilhosa e se desenvolve até Vilar Formoso, que faz fronteira com Espanha. Nela circulam comboios intercidades, regionais e alfa pendular, para além de comboios de mercadorias.

O trecho analisado situa-se entre Guarda e Vilar Formoso, mais precisamente entre os perfis quilométricos (Pk) 216+380 e 240+150, desde a estação de Vila Fernando até pouco depois da estação de Castelo Mendo, respetivamente (Figura 3.1). Este apresenta aproximadamente 24km de extensão e permite a ligação entre as povoações de Vila Fernando, Rochoso, Cerdeira, Miuzela e Castelo Mendo. O troço desenvolve-se paralelamente ao Rio Noémi, desde Vila Fernando até Castelo Mendo, local onde esta linha de água desagua no Rio Côa. O crescimento do Pk faz-se, também ele, no sentido Vila Fernando – Castelo Mendo.



LE e LD, representam lado esquerdo e lado direito da linha férrea, respetivamente

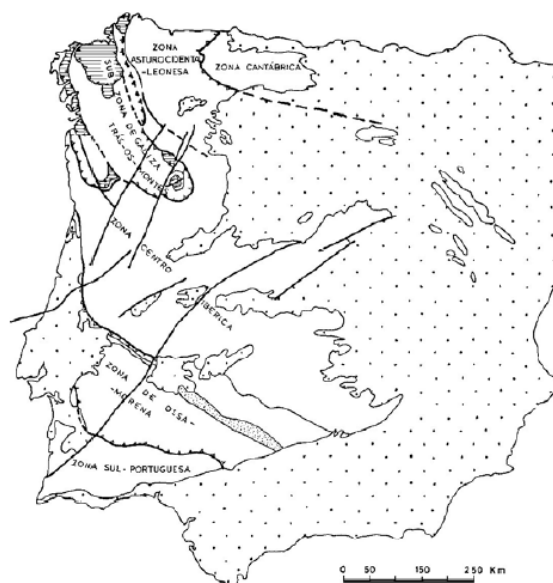
*adaptado de GoogleMaps 2017*

**Figura 3.1 – Trecho de via estudado entre Guarda-Vilar Formoso**

## 3.2 Enquadramento geológico e geotectónico

### 3.2.1 Geral

A área de estudo insere-se na Zona Centro Ibérica (ZCI), que por sua vez constitui uma unidade integrante do Maciço Hespérico - Figura 3.2. O Maciço Hespérico é uma das unidades morfológicas mais antigas da Península Ibérica, com mais de 200 Ma, que ocupa a zona oeste e central da mesma. Adjacentemente a esta unidade formaram-se bacias sedimentares, nomeadamente as Bacias do Douro, do Tejo, do Guadiana e do Tejo-Sado. O Maciço Hespérico encontra-se dividido pela Cordilheira Central na direção ENE-WSW e subdivide-se em diferentes zonas tectono-estratigráficas (Ribeiro, Sousa, & Noronha, 1991). Reconhecem-se, desta forma a Zona Cantábrica (ZC), a Zona Astúrico Leonesa (ZAL), a Zona Centro Ibérica (ZCI) – que inclui a Zona Galaico Transmontana (ZGT), a Zona Ossa Morena (ZOM) e a Zona Sul Portuguesa (ZSP) - Figura 3.2.



*Pereira, 2014*

**Figura 3.2 - Unidades tectono-estratigráficas do Maciço Hespérico**

Nesta secção inclui-se uma introdução à ZCI no sentido de enquadrar, geológica e geotectonicamente, a zona de estudo.

A ZCI abrange a zona central da Península Ibérica e corresponde ao segmento da Cadeia Varisca Europeia, cujos afloramentos de maior extensão são de natureza granítica (Dias, Araújo, Terrinha, & Kullberg, 2013). Do ponto de vista paleogeográfico, apresenta uma discordância do quartzito armoricano com o Complexo Xisto-Grauváquico (Ferreira, 1991). O ciclo varisco da ZCI compreende três fases de deformação dúctil ( $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ ), que envolvem diferentes

acontecimentos (Dias et al., 2013), são ainda observáveis eventos de metamorfismo de diferentes domínios de grau metamórfico (Pereira, 2014).

Ao longo do processo de evolução da ZCI parece haver uma relação entre os processos de metamorfismo, deformação e magmatismo, influenciando-se mutuamente (Dias et al., 2013).

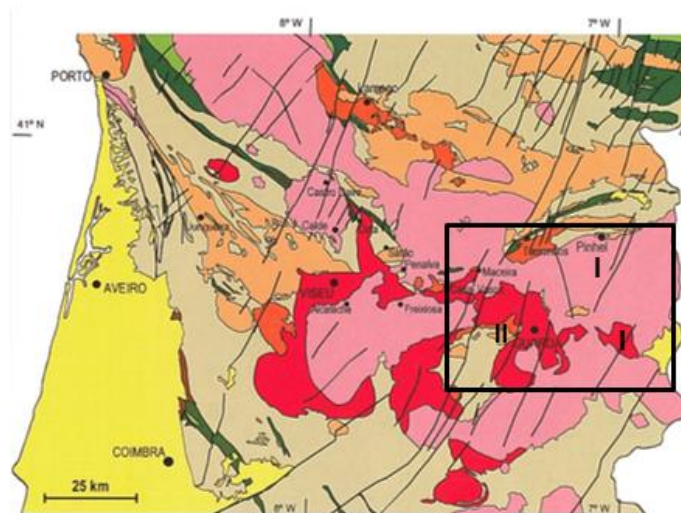
A primeira fase (D<sub>1</sub>) é o resultado da colisão da Laurásia com a Gondwana, durante o Devónico. Esta é uma fase que resulta no empilhamento de várias unidades de atuação de tectónica tangencial com a instalação de mantos autóctones e parautoctones (Pereira, 2014). Nesta fase, os metassedimentos afetados pelas diferentes fases da orogenia varisca terão sido afetados por metamorfismo regional de pressão intermédia, do tipo Barroviano, associada a zonas de cisalhamento (Dias et al., 2013).

Numa segunda fase (D<sub>2</sub>) ocorreu a instalação de estruturas extensionais que vêm compensar o sobresspessamento da crosta (Pereira, 2014), conduzindo ao aparecimento do orógeno (Dias et al., 2013). O auge do metamorfismo regional, iniciado na fase anterior, é atingido acompanhado de intensa migmatização.

Na última fase (D<sub>3</sub>) desenvolve-se a deformação intracontinental, por reajuste entre a Laurussia e Gondwana (Pereira, 2014). Durante esta etapa dá-se a ascensão, a diferenciação e a consolidação de grandes quantidades de magma granítico e, consequentemente, a instalação de estruturas denominadas de batólitos (Dias et al., 2013). Estudos revelam que o plutonismo granítico, da idade varisca, na ZCI se encontra preferencialmente relacionado com esta fase, subdividindo os granitoides variscos em quatro grandes grupos: ante-D<sub>3</sub>, sin-D<sub>3</sub>, tardi-D<sub>3</sub> e pós-D<sub>3</sub> - Tabela 3.1 e Figura 3.3. Os maciços ante-D<sub>3</sub> e sin-D<sub>3</sub> apresentam as mesmas características, sendo que os primeiros são pouco frequentes em Portugal, pelo que não se encontram incluídos na Tabela 3.1

**Tabela 3.1 - Classificação geocronológica dos granitos variscos (adaptado de Dias et al., 2013)**

<b>Granitóides variscos</b>	
<b>Classificação</b>	<b>Fácies mais comuns</b>
Granitóides tardi-pós-D <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- granitóides biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas por vez porfiróides</li> <li>- granitos essencialmente biotíticos, frequentemente porfiróides</li> <li>- gabros, dioritos, monzodioritos quartzicos, granodioritos</li> </ul>
Granitóides sin-D <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- leucogranitos e granitos de duas micas, com deformação variável</li> <li>- granodioritos e granitos biotíticos, com deformação variável</li> </ul>



I - granitóides tardi-pós-D3 e II – granitóides sin-D3 na zona de estudo

**Figura 3.3 - Esquema geológico da distribuição dos granitos variscos na zona de estudo, extraído de Dias et al., 2013**

### 3.2.2 Geologia da zona de estudo

Na caracterização da área de estudo recorreu-se às cartas geológicas de Almeida (Folha 18-B), da Guarda (Folha 18-C) e de Nave de Haver (Folha 18-D), na escala 1/50.000, de modo a reconstruir o trecho estudado na linha de caminhos-de-ferro entre Guarda e Vilar Formoso. A caracterização da zona envolvente tem como base as respetivas notícias explicativas.

A zona estudada é essencialmente de natureza granítica, nomeadamente granitos monzoníticos de várias granulometrias. A linha férrea atravessa ainda algumas manchas xistentas, filões predominantemente quartzosos, de rochas básicas e aplíticos. É ainda possível observar depósitos aluviais nos vales de alguns rios. Nesta zona predominam alguns sistemas de falhas pouco importantes, orientados segundo a direção NE-SW.

Em seguida detalham-se alguns aspetos das formações intersetadas.

#### ***Terrenos de cobertura***

##### **a – Formações aluviais**

No fundo dos vales de alguns rios observam-se depósitos aluvionares, pouco extensos, compostos essencialmente por areias e argilas, cuja sua origem está ligada à desagregação dos granitos. Algumas das manchas aluviais mais importantes são as do Rio Côa, Ribeira de Alfaiates e Ribeira dos Tourões.

## ***Rochas de soco antigo***

### **Complexo xisto-graváquico ante-ordovícico e séries metamórficas derivadas**

Os afloramentos são compostos predominantemente por xistos micáceos, xistos quartzo-micáceos e corneanas quartzo-pelíticas. A linha atravessa, na zona da Cerdeira (Pk 9+432), uma mancha xistenta alongada na direção NW-SE. Neste afloramento predominam, para além dos xistos micáceos, pertencentes a fenómenos de silicificação, algumas camadas de natureza gresosa e quartzitos.

### **Granitos monzoníticos**

O granito monzonítico apresenta-se por toda a zona que envolve o caminho-de-ferro, integrando-se na grande mancha granítica da Beira. Este apresenta variações na sua textura e granulometria, sendo mais uniforme do ponto de vista da composição mineralógica. A passagem de uns tipos de granitos para outros é feita de forma gradual. Porém, existem zonas em que o contacto é brusco e bem evidente. Em algumas zonas apresenta-se mais alcalino e pode-se separar em dois tipos essenciais: a) granito porfiróide e b) granito não porfiróide. Estes não apresentam diferenças petrográficas relevantes; no entanto, assinalam-se algumas diferenças morfológicas que permitem as diferentes designações:

- a) Os caos de blocos do granito porfiróide apresentam dimensões consideráveis sendo possível determinar a rede de diaclases que os originou;
- b) Os blocos do granito não porfiróide apresentam dimensões menores, formas tabulares e encontram-se dispostos irregularmente.

### **$\gamma \pi_g$ – Granito porfiróide de grão grosseiro e grosseiro a médio**

Constitui uma larga escala da zona estudada, ocupando grande parte da região da Guarda e zonas envolventes. Nas povoações de Porto de Ovelha (Pk 14+095) e nas imediações de Monte Perobolço aparece com orientação NW-SE, penetrando novamente na região compreendida entre Freineda, Malhada Sorda e Poço Velho.

Este granito mostra tendência para alcalino, contendo algumas inclusões de encraves xistentos. Mineralogicamente, apresenta megacristais de feldspato, que às vezes evidenciam uma certa orientação e, outras vezes, encontram-se dispostos irregularmente. Podem ainda conter minerais de andaluzite, silimanite e, em algumas zonas, a presença de xenólitos de natureza biotítica.

### **$\gamma \pi_m$ – Granito porfiróide de grão médio a fino**

Granito com composição mineralógica idêntica ao anteriormente descrito, porém os megacristais apresentam dimensões menores. Nota-se uma passagem gradual a brusca ao granito que o envolve ( $\gamma \pi_g$ ).

### **$\gamma \pi_f$ – Granito porfiróide de grão fino**

São observáveis as machas deste tipo de granito envoltas pelo granito porfiróide de grão grosseiro, sendo os afloramentos mais importantes os que se situam entre Monte Carreto, Vila Mendo e Vila Fernando e o que se prolonga de Peroficós por Monte Margarida a Vale de Loba. Os limites são bruscos e muito evidenciados.

As manchas de Peroficós e Vila Fernando apresentam-se bastante escuras e pouco homogêneas devido à percentagem de biotite que as constitui e a sua desigual distribuição. Relativamente às características mineralógicas, estas são idênticas às do  $\gamma \pi_g$ .

### **$\gamma \pi'_g$ - Granito não porfiróide de grão grosseiro**

Apresenta-se na região de Parada, contactando na maior parte da sua extensão com  $\gamma \pi_g$ , enquanto que a NE de Pousade o contacto faz-se com os xistos e granito de grão fino ( $\gamma \pi_f$ ).

### **$\gamma \pi'_m$ – Granito não porfiróide de grão médio a fino**

Observam-se pequenos afloramentos nas regiões de Repoula e perto de Vila Fernando (Pk 0+514) de granito de grão médio, com tendência alcalina. Forma diversas manchas nas regiões de Freineda, Vilar Formoso (Pk 35+344) e Nave. A sua composição mineralógica é idêntica ao  $\gamma \pi_f$ , contudo, é de notar a presença de fluorite a SW de Freineda e de andaluzite a norte de Vilar Formoso. Os seus limites são pouco claros, apresentando contornos muito irregulares.

### **$\gamma \pi'_f$ - Granito não porfiróide de grão médio a fino ou de grão fino**

Este tipo de granito constitui diferentes ilhotas, merecendo especial atenção a de Rochoso, que se estende tanto para norte como para sul desta povoação, que mostra uma certa tendência a porfiróide, contactando com os xistos da mancha da Cerdeira (Pk 9+432), Tojais e Pombal. Podem ser observados pequenos afloramentos a nordeste de Vila Fernando. A sul do Rio Noémi, a rocha passa gradualmente a granito porfiróide de grão fino com aparecimento de megacrístais.

Nas zonas de Mesquitela, Castelo Mendo (Pk 20+635), SW de Freineda, surgem manchas deste tipo de litologia no meio do granito grosseiro bem delimitadas. A rocha aparece sempre muito alterada com composição mineralógica idêntica aos granitos já descritos. É importante referir que na zona da Mesquitela e Castelo Mendo, a textura é cataclástica, com quartzo muito fraturado e saturado.

### ***Rochas filonianas***

A presença de filões encaixados, quer nas rochas graníticas, quer nas rochas xistentas, é elevada, sendo os mais abundantes os filões de quartzo, filões de rochas básicas e filões aplito-pegmatíticos. A zona estudada é intersectada por alguns filões aplíticos.



### **q – Filões de quartzo**

Os filões de quartzo apresentam, geralmente, textura brechóide, o quartzo é leitoso de espessura e comprimento variáveis e a sua direção predominante é NE-SW ou NNE-SSW. Embora estes aflorem por toda a área estudada, são de notar os filões que ladeiam o Rio Côa, a região de Repoula e a região SW de Vilar Formoso. Nesta última zona observam-se filões, orientados ENE, com mineralizações de volframite, azurite, calcopirite, cuporschelite e malaquite que originaram explorações mineiras.

A observação da rede filoniana de quartzo evidencia a rede de fraturas denominadas alpinas, que terá condicionado, em alguns casos, a orientação de cursos de água como o Rio Côa e o Rio Noémi.

### **δ – Filões de rochas básicas**

Muito frequentes na zona da Guarda, estes filões apresentam-se geralmente verticais ou sub-verticais com orientações E-W, NW-SE ou NNE-SSW. Apresentam entre 1 a 2 m de espessura, podendo, por vezes, atingir espessuras maiores, e os tipos de rocha que os constituem compreendem doleritos, basanitos, lamprófilos entre outros. Na zona SW da Freineda e Mesquitela, observam-se cortes nas trincheiras do caminho-de-ferro, cuja orientação é N30°E e onde, num deles, se observa disjunção esferoidal.

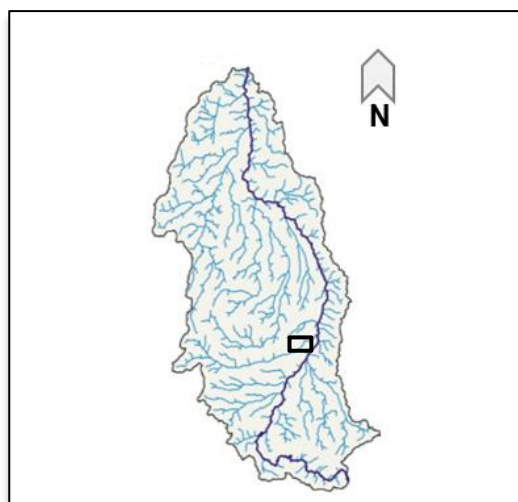
### **$\gamma_a$ - Filões aplíticos**

Assinalam-se como filões aplíticos mais importantes, os que se situam a sul de Freineda, com orientação ENE e mineralização de volframite. É uma rocha de grão fino, composta essencialmente por quartzo, moscovite, biotite, clorite, granadas, etc. Em alguns pontos a rocha assume aspeto de xisto quartzo-sericítico, devido à intensa catáclase sofrida.

Outro filão importante é o que passa entre Ade e Monte Perobolço, cuja orientação é aproximadamente ENE-WSW e apresenta as mesmas características que o filão de Freineda.

### **3.2.3 Hidrogeologia da zona de estudo**

A região em estudo pertence à bacia hidrográfica do Douro, mais precisamente à bacia do Rio Côa (Figura 3.4), localizada na Meseta, e cuja área total é de 2521 km<sup>2</sup>. Esta apresenta uma forma alongada, pouco declivosa, relevo reduzido e uma altitude média de 690m (Jorge, 2009).



*adaptado de Jorge, 2009*

**Figura 3.4 – Rede hidrográfica do Rio Côa**

O trecho da ferrovia analisado acompanha o percurso do Rio Noémi, que nasce no Vale de Estrela, concelho da Guarda, por volta dos 1000m de altitude e atravessa as localidades desde Barracão a Porto de Ovelha. Este é um rio com cerca de 40 km de extensão, que corre de oeste para este e desagua no Rio Côa, em Porto de Ovelha.

O Rio Côa apresenta cerca de 140 km de extensão e nasce a NE da Serra da Malcata, a mais de 1100m de altitude, no concelho do Sabugal. A sua orientação é praticamente S-N e o seu percurso encaixa segundo uma linha de fragilidade tectónica, que constitui um vale amplo e relativamente deprimido. A sua litologia alterna, de forma muito genérica, entre o complexo xisto-grauváquico na zona sul, as rochas granitóides no centro e novamente o complexo xisto-grauváquico do grupo Dúrico-Beira (Clamote & Salgado, 2011).

### **3.3 Caracterização da ferrovia**

De forma a aplicar os sistemas classificativos utilizados para a avaliação e gestão do risco da ferrovia, foi necessário proceder à caracterização prévia da mesma. Esta caracterização teve em conta fatores como o tráfego, a velocidade de circulação dos comboios, o número de vias, os acidentes ocorridos nos últimos anos, entre outros.

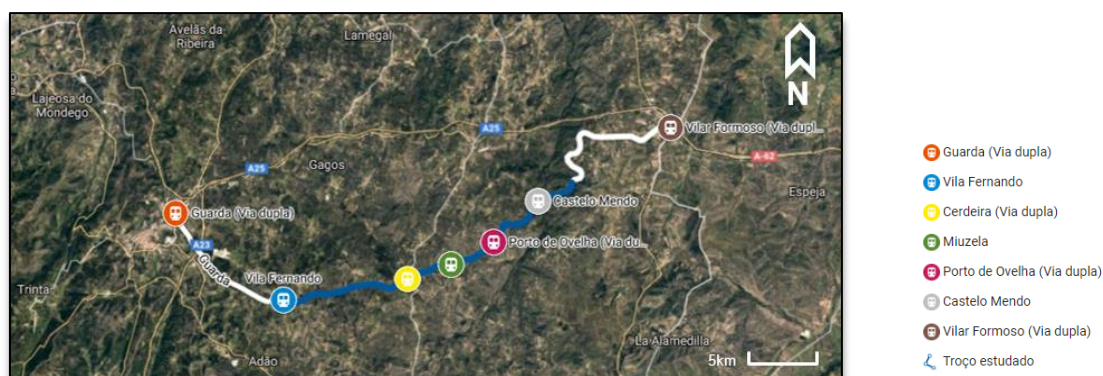
Após a recolha de informações perante diferentes entidades constatou-se que esta é uma ferrovia de circulação normal, de tráfego internacional de passageiros e mercadorias, sendo a principal ligação ferroviária entre Portugal e o resto da Europa. O seu tráfego médio horário (TMH) é de 2,6, o que corresponde à circulação de uma média de 13 comboios num período de 6 horas no troço estudado, segundo a Direção Comercial e Desenvolvimento de Negócio das Infraestruturas de Portugal. O seu traçado é muito sinuoso, pelo que as direções são variáveis

nos diferentes troços - Tabela 3.2, e a velocidade limite dos comboios está compreendida entre 90km/h e 160km/h onde: entre as estações da Guarda e Cerdeira a velocidade máxima varia entre 120 e 160km/h e, entre Cerdeira e Vilar Formoso, a velocidade máxima situa-se entre 90 e 120 km/h.

**Tabela 3.2 – Direções da linha férrea nos diferentes Pks**

<b>Pk</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Direção</b>
0+00	1133	N86ºW
1+220	113	N83ºE
1+708	337	N59ºE
2+770	413	N82ºW
3+183	227	N88E
3+520	288	N63,5ºE
3+808	912	N80ºE
5+135	425	N67ºE
5+560	1413	N83ºE
7+372	938	N72ºW
8+315	182	N80ºW
8+530	2030	N55ºE
10+560	550	N76,5ºE
11+110	763	N45ºE
11+873	502	N80ºW
12+375	750	N46,5ºW
13+125	450	N82ºW
13+575	325	N59ºE
13+900	40	N80ºE
13+940	2788	N51ºE
16+730	875	N13ºE
17+605	800	N72ºW
18+405	250	N80ºE
18+655	738	N48,5ºE
19+395	1187	N19ºE
20+580	750	N44ºE
21+330	730	N77ºE
22+060	500	N84ºE
22+560	500	N56ºE
23+060	250	N78ºE
23+310	250	N42ºE

Uma grande parte do trecho estudado é via de circulação única, sendo que existem quatro estações (e apeadeiros) com via duplicada. Na Figura 3.5 e Tabela 3.3, encontram-se representadas as estações com via única ou duplicada, no troço analisado, e as distâncias totais entre as mesmas.



*adaptado de GoogleMaps 2017*

**Figura 3.5 – Identificação das estações com via dupla no trecho estudado**

**Tabela 3.3 – Distância total entre estações de via dupla do troço estudado**

Ponto Inicial	Ponto final	Distância total (km)
Guarda	Vila Fernando	10,557
Vila Fernando	Cerdeira	8,978
Cerdeira	Miuzela	3,213
Miuzela	Porto de Ovelha	1,450
Porto de Ovelha	Castelo Mendo	6,740
Castelo Mendo	Vilar Formoso	14,709

Nos últimos 10 anos registaram-se vários acidentes na Linha da Beira Alta, sendo que pelo menos dois deles foram descarrilamentos causados por movimentos de massa (junho de 2013 e janeiro de 2016), embora sem vítimas, segundo o Instituto da Mobilidade e Transporte, I.P. (IMT, 2015).

### **3.4 Caracterização dos taludes de escavação**

#### **3.4.1 Metodologia de trabalho**

A metodologia de trabalho adotada no estudo de reabilitação de taludes de escavação em ferrovias dividiu-se, essencialmente, em três etapas: **i)** recolha bibliográfica, **ii)** trabalho de campo e **iii)** trabalho de gabinete.

Na primeira etapa procedeu-se à pesquisa bibliográfica de forma a caracterizar a zona de estudo. Esta pesquisa consistiu na recolha de informações sobre a localização geográfica, características geológicas e hidrogeológicas da zona e características inerentes à ferrovia – secções 3.1 a 3.3.

A segunda etapa baseou-se na observação dos taludes adjacentes à ferrovia, com vista a caracterizá-los, analisá-los e mais tarde atribuir-lhes a devida priorização de intervenção. Para tal, procedeu-se para cada talude à:

- ✓ Caracterização da geometria;
- ✓ Medição da atitude dos taludes, com recurso à bússola equipada de clinómetro;
- ✓ Caracterização do grau de alteração (Tabela 2.4);
- ✓ Caracterização do grau de fracturação (Tabela 2.5);
- ✓ Caracterização litológica;
- ✓ Realização de ensaio expedito *in situ*, de modo a determinar a dureza ao resalto da rocha, com recurso ao martelo de Schmidt (esclerómetro);
- ✓ Identificação das zonas com presença de vegetação na face do talude descriminando o respetivo porte;
- ✓ Identificação de zonas de percolação de água;
- ✓ Identificação de blocos salientes;
- ✓ Identificação dos mecanismos de rotura potenciais e reais;
- ✓ Identificação de sistemas de drenagem e do seu estado de conservação.

Adicionalmente, procedeu-se à caracterização dos sistemas de descontinuidades que compõem o maciço, analisando características como a sua orientação, a persistência, o enchimento, a rugosidade, o espaçamento e a abertura. No trabalho de campo, foi ainda realizada uma descrição detalhada da vala de captação, que envolveu parâmetros como a respetiva forma, largura e profundidade.

De modo a proceder ao tratamento dos dados recolhidos em campo foram realizados registos fotográficos dos diferentes taludes ao longo do trecho estudado.

A última etapa envolveu o trabalho de gabinete, que consistiu na organização e tratamento dos dados recolhidos em campo.

Devido ao elevado número de taludes inventariados (129), procedeu-se a uma seleção inicial, de modo a eliminar aqueles que não representariam risco para a via, recorrendo ao ábaco de Ritchie para determinar o dimensionamento ideal das valas de captação (largura e profundidade), a partir da altura e da inclinação do talude. Desta forma, os taludes que cumpriam os critérios de dimensionamento foram arquivados, não sendo realizado o seu estudo aprofundado, passando-se a tratar dos restantes.

Na análise efetuada no campo observou-se que os mecanismos de rotura eram essencialmente em queda livre, por rotura planar e em cunha. Destes mecanismos, o mais persistente, foi o de queda livre devido à inclinação sub-vertical dos taludes, não sendo por isso necessário recorrer a outros métodos de análise, como por exemplo a análise cinemática.

De modo a avaliar os taludes que representam risco, tal como já foi referido, recorreu-se ao sistema de classificação USMS, cujo objetivo é avaliar o risco que os taludes representam para a via e para o utente, recorrendo aos critérios descritos na secção 2.3.2.1. Uma vez que esta classificação se aplica a taludes em rodovias, foi necessário adaptar os critérios para que a sua aplicação no caso das ferrovias fosse de encontro com os respetivos requisitos – secção 4.

### 3.4.2 Reconhecimento de campo

Nesta secção procede-se à caracterização geológica e geomecânica dos taludes em estudo, nomeadamente, os mecanismos de rotura, os parâmetros que os caracterizam e os problemas que possam levar à sua instabilização.

Tal como referido anteriormente, o acesso à ferrovia foi um fator de restrição à recolha de dados para o presente estudo, tendo sido por isso adotada uma recolha de dados de campo seletiva baseada em métodos expeditos.

No âmbito da reabilitação de taludes na linha da Beira-Alta, entre o trecho Guarda e Vilar Formoso, foi elaborada uma ficha de campo para caracterização de acidentes e incidentes em taludes rodovias e ferroviários – APÊNDICE I. A elaboração desta ficha teve como objetivo facilitar a recolha de dados em campo, onde constavam todas as características necessárias para avaliação dos taludes. O levantamento dos taludes foi realizado entre o Pk 216+380 e o Pk 240+090, ao longo da linha férrea, baseando-se em métodos expeditos, com os quais foi possível detetar os seguintes problemas:

- ✓ Ausência de sistemas de drenagem na crista e na face dos taludes;
- ✓ Existência de algumas consolas de granito - Figura 3.6;
- ✓ Valetas de drenagem de plataforma, quando existentes, obstruídas ou em mau estado de conservação - Figura 3.6;



- ✓ Presença de blocos na vala de captação ao longo da ferrovia e na crista do talude- Figura 3.7.



Bloco em consola com representação do balanço



Vala de drenagem em mau estado

**Figura 3.6 – Registo de situações críticas observadas em campo**



**Figura 3.7 – Blocos soltos na vala de captação (esquada) e na crista do talude (direita)**

Observaram-se ainda taludes que se encontravam muito afastados da via, pelo que, logo à partida, não foram analisadas as suas características por não representarem qualquer tipo de perigo para o carril mais próximo - Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Talude muito afastado da via (Pk 0+000)**

Relativamente à geologia, observaram-se maciços graníticos variando de grão grosseiro a fino - Figura 3.9, tendo sido identificada uma zona de afloramento de xistos ao Pk 9+432 - Figura 3.10.



**Figura 3.9 – Granito de grão grosseiro (esquerda) e grão fino (direita)**



**Figura 3.10 – Afloramento de xistos ao Pk 9+432**

No que diz respeito às características do maciço, este apresenta um grau de alteração variável de zona para zona, podendo em certos locais apresentar um nível W<sub>5</sub>, muito alterado, com



abundância de vegetação herbácea e noutros casos arbórea. Noutras situações, e na maior parte das vezes, o maciço apresentava-se são a pouco alterado,  $W_{1-2}$ , não representando à partida grande risco de movimentos – Figura 3.11. Quanto ao grau de fracturação, este é igualmente variável, podendo ser  $F_{1,2}$  (afastados) ou  $F_3$  (medianamente afastados), segundo ISRM (1980) - Figura 3.12.



**Figura 3.11 - Vista de um talude em maciço muito alterado (esquerda) e de um talude em maciço são (direita)**



**Figura 3.12 – Maciço com fraturas medianamente afastadas (esquerda) e afastadas(direita)**

O reconhecimento de campo implicou também a análise dos sistemas de descontinuidades, identificando-se genericamente características como a respetiva abertura, espaçamento, persistência e enchimento - Figura 3.13 e Figura 3.14.



**Espaçamento de descontinuidades da mesma família**



**Persistência**

**Figura 3.13 – Representação das características das descontinuidades num maciço rochoso**



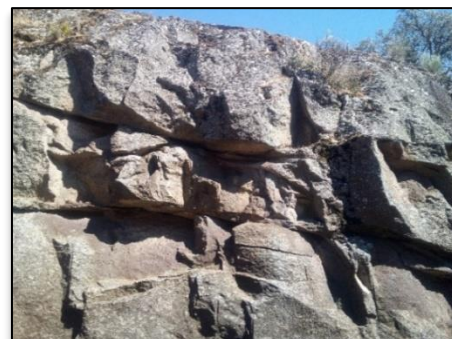
**Espessura de preenchimento**



**Abertura**

**Figura 3.14 – Representação das características das descontinuidades num maciço rochoso**

Foram ainda identificados diferentes mecanismos potenciais de rotura: rotura planar, rotura em cunha, tombamentos, embora pouco frequentes, deslizamentos em solos nas zonas mais alteradas do maciço e quedas de blocos - Figura 3.15 e Figura 3.16.



**Figura 3.15 - Mecanismos pontenciais de rotura por tombamento (esquerda) e em queda (direita)**





**Figura 3.16 - Possível mecanismo de rotura em cunha**

Os sistemas de drenagem na base do talude (valetas e caleiras), não se encontram sempre presentes, podendo às vezes estar cobertos, entupidos ou em mau estado de conservação, não efetuando corretamente a sua função. Quanto às valas de captação são, por norma, trapezoidais, e a sua largura considerada, neste estudo, consiste na distância do sopé do talude até à travessa - Figura 3.17.



**Figura 3.17 – Distância de captação considerada na análise de eficácia da vala**

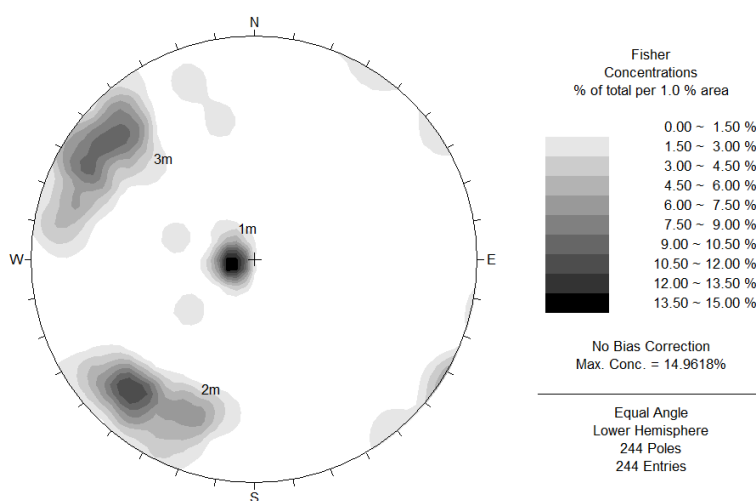
### 3.4.2.1 Análise dos taludes e dos sistemas de descontinuidades

Nesta secção apresentam-se e analisam-se as atitudes médias dos planos dos taludes e das respetivas descontinuidades, recorrendo ao programa *DIPS 5.0*. Este *software* permite realizar uma análise estatística das descontinuidades e ainda identificar os mecanismos de instabilidade associados aos taludes, possibilitando, desta forma, efetuar a análise cinemática dos mesmos.

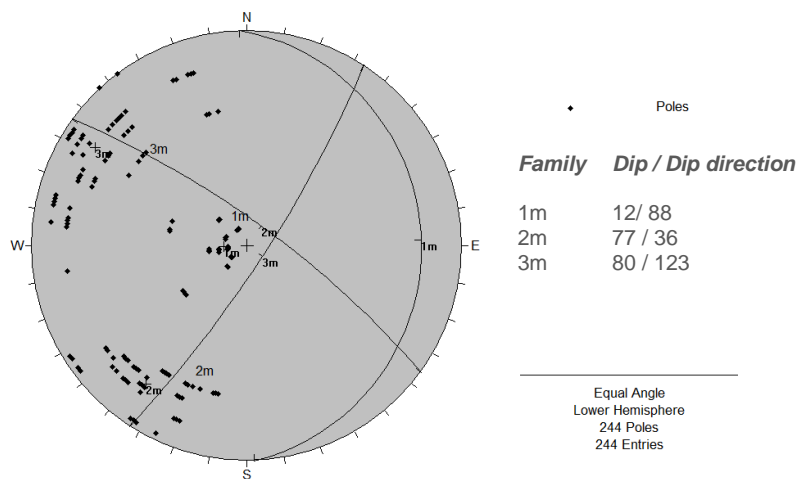
Com os dados geológicos recolhidos em campo foi possível, com recurso ao *DIPS 5.0*, confirmar as situações potenciais de instabilidade dos planos dos taludes e das descontinuidades de acordo com o apurado em campo. Os termos *Dip* e *Dip direction* denominam a inclinação média e o azimute médio dos planos, respetivamente.

As direções preferenciais médias dos planos dos taludes observados variam entre NE-SW e NW-SE. Esta variação deve-se essencialmente à sinuosidade do traçado da ferrovia. A inclinação principal dos taludes é sub-vertical, próxima de  $90^\circ$  (*Dip* igual a  $86^\circ$ ) para a maioria dos casos.

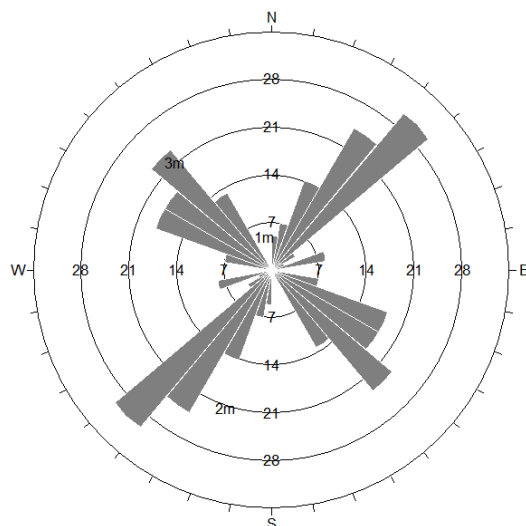
No diagrama de Schmidt-Lambert - Figura 3.18, referente às descontinuidades, são identificáveis três principais famílias de descontinuidades, denominadas de *1m*, *2m* e *3m*. Estas são consideradas as principais por apresentarem uma concentração maior, que se insere no intervalo [13,5%-15,0%] e cujo valor máximo corresponde à família *1m* (14,9%). Na Figura 3.19 apresentam-se os polos das descontinuidades identificadas e os planos correspondentes a cada família. Segundo o diagrama de rosetas - Figura 3.20, constata-se que as suas direções preferenciais são N 50-60°E, N40-50°E e N40-50°W. A partir do *Dip* conclui-se que as inclinações destas famílias variam entre sub-verticais e sub-horizontais, com inclinações médias de  $80^\circ$  e  $12^\circ$ , respetivamente.



**Figura 3.18 – Diagrama de Schmidt-Lambert – zonas de isodensidades dos pólos das descontinuidades**



**Figura 3.19 – Orientação média dos planos das principais famílias de descontinuidades**



**Figura 3.20 - Diagrama de roseta para as descontinuidades analisadas**

### 3.4.2.2 Dureza ao ressalto e resistência à compressão uniaxial

Nesta secção referem-se os dados recolhidos em campo relativos à dureza ao ressalto, bem como a análise e discussão dos seus resultados.

Tal como referido na secção 3.4.1, realizaram-se em campo ensaios para avaliar a dureza ao ressalto do maciço através do martelo de Schmidt, e quando cruzado com o peso volúmico da rocha ( $27 \text{ kN/m}^3$ ), permite estimar a resistência à compressão uniaxial – RCU. Para a realização deste ensaio foram levados para o campo dois tipos de martelo: o tipo N e o tipo L. O martelo tipo L é um martelo que faz uma medição automática, isto é, fornece o valor médio da dureza, sem ser necessário recorrer ao seu cálculo manual, por este motivo, na Tabela 3.4 apresenta-se o desvio padrão apenas para o martelo de tipo N, que já exige um cálculo manual por parte do

utilizador. Nessa mesma tabela encontram-se os valores médios da dureza ao ressalto obtidos em campo e os respetivos valores de RCU estimados, bem como a sua dispersão média.

**Tabela 3.4 - Resistência à compressão uniaxial estimada através da dureza ao ressalto (martelo de Schmidt)**

Local da medição	Média da dureza ao ressalto	Tipo de martelo	Desvio padrão	Peso volúmico [kN/m <sup>3</sup> ]	RCU [MPa]	Dispersão média [MPa]
Pk 5+760- LD	36	Tipo N	3,27	27	35	±6,7
Pk 5+760 - LE	56		3,64		72	±8,0
Pk 11+966	49		4,73		55	±7,6
Pk 14+390	62	Tipo L	-		250	±130
Pk 16+340	67		-		250	±130
Pk 16+740	52		-		166	±70
Pk 18+320	49		-		138	±50

Os valores médios de RCU obtidos indicam que a rocha é de resistência elevada variando entre extremamente dura a dura, conforme o observado em campo. Estes resultados inserem-se na gama de valores de referência para rochas graníticas intactas, [50 – 300MPa], indicados por Vallejo & Ferrer, 2011. Contudo, ao Pk 5+760 foi obtido um valor de RCU fora do intervalo de referência, o que se pode traduzir num grau de alteração da rocha ligeiramente superior, ou estar associado ao facto do martelo utilizado ser do tipo N, que é mais indicado para rochas de dureza mais elevada. Verifica-se que com o martelo do tipo L, se obtiveram valores muito superiores aos do martelo do tipo N, o que pode estar realmente relacionado com o facto de este ser o mais indicado para a dureza (elevada) das rochas estudadas.

## 4. Avaliação do risco

### 4.1 Dimensionamento das valas de captação - ábaco de Ritchie

De acordo com o descrito na secção 3.4.1, a primeira fase do trabalho em gabinete da metodologia adotada consiste na triagem dos taludes a avaliar. Esta etapa foi realizada com recurso ao ábaco de Ritchie (Figura 2.1) que recomenda o dimensionamento ideal das valas de captação para um determinado talude, em termos da respetiva largura e profundidade.

Este ábaco permite aferir que, quando as valas de captação, medidas em campo, se encontram em conformidade com os critérios recomendados, pode considerar-se que as quedas de blocos dos taludes não representam perigo de atingir via. Nesta etapa priorizou-se o critério da largura, visto que os mecanismos de rotura identificados são em queda livre, planar e alguns por cunha, não ocorrendo fenómenos significativos de rolamento ou ressalto dos blocos, e o balastro da plataforma funcionar como amortecedor à queda dos mesmos. Quando ocorrem trajetórias em ressalto ou rolamento, deverá ser dada maior importância ao critério da profundidade, para evitar que estes cheguem à via. Os taludes cujas valas de captação não cumpram os critérios de dimensionamento são avaliados de modo particular em seguida.

Para além da análise descrita anteriormente, alguns dos taludes observados em campo encontravam-se muito afastados da ferrovia ou apresentavam alturas menores que 3m, e/ou não apresentavam sinais de instabilização considerando-se, desta forma, que não põem em risco a segurança da mesma. Na Tabela 4.1 encontram-se listados os taludes analisados. Do número total de taludes inventariados cerca de 38% não representam risco para a ferrovia, sendo que 13% cumpriam os critérios de dimensionamento da vala e cerca de 25% encontram-se ou muito afastados da via ou apresentam alturas reduzidas, inferiores a 3m, e/ou não apresentam sinais de instabilização.

Alguns dos taludes estudados não cumpriam os critérios de dimensionamento por valores centesimais, pelo que foram considerados como não sendo de risco uma vez que a diferença entre os valores medidos e os valores recomendados, para as valas de captação, era muito pouco significativa, como é o caso do Pk 8+060 (Tabela 4.1). Para os casos em que não se indicam algumas das características relativamente às dimensões das valas de captação (Pk 1+710), esses taludes foram considerados, aquando da realização do estudo de reconhecimento de campo, como não representativos de risco, inserindo-se nos 25% anteriormente referidos.

**Tabela 4.1 – Taludes sem risco para a ferrovia**

Pk	Altura máxima talude (m)	Largura da vala medida (m)	Largura da vala recomendada (m)	Profundidade da vala recomendada (m)
0+00	5,40	>3,00	3,56	1,29
0+100	-	>2,00	-	-

**Tabela 4.1 – Taludes sem risco para a ferrovia (continuação)**

<b>Pk inicial</b>	<b>Altura máxima talude (m)</b>	<b>Largura da vala medida (m)</b>	<b>Largura da vala recomendada (m)</b>	<b>Profundidade da vala recomendada (m)</b>
0+895	2,2	LD= 1,80; LE=2,20	1,8	0,53
1+220	<8,00	>2,00	-	-
1+520	1,60	>2,00	1,2	0,35
1+670	1,00	2,00	0,8	0,25
1+710	<4,00	>2,00	-	-
2+620	<3,00	>2,00	-	-
2+940	7,50	>2,00	-	-
3+070	2,00	2,00	1,55	0,45
3+620	2,50	2,50	2,06	0,6
4+220	2,50	2,50	2,06	0,6
4+400	1,70	1,60	1,24	0,36
4+480	2,00	2,50	1,4	0,41
4+560	4,50	>2,00		
4+560	4,50	>2,00	-	-
5+135	LD: 1,80 LE: 2,00	1,80	LE= 1,55; LD=1,26	LE=0,45 ; LD= 0,38
5+560	<3,00	>2,00	-	-
5+660	3,00	>2,00		
5+890	2,50	LD= 2,2; LE=1,7	2,06	0,6
6+360	3,00	>2,00		
6+980	1,40	2,50	0,93	0,27
7+160	1,80	1,40	1,26	0,38
7+410	4,00	>2,00		
7+910	2,80	2,80	2,17	0,63
8+060	3,00/4,00	2,20	2,32	0,72
8+580	LD:4,00 LE: 3,20	>2,00	-	-
9+160	4,50	>2,00	-	-
9+820	3,00	>2,00	-	-
9+990	4,00	2,30	3,1	0,91
10+100	1,65	2,00	1,24	0,36
10+360	1,20	>2,00	-	-
10+560	3,00	2,00	2,32	0,72
10+830	4,00	>2,00	-	-



**Tabela 4.1 – Taludes sem risco para a ferrovia (continuação)**

Pk inicial	Altura máxima talude (m)	Largura da vala medida (m)	Largura da vala recomendada (m)	Profundidade da vala recomendada (m)
11+060	4,00	>2,00	-	-
11+490	3,00/4,50	>2,00	-	-
12+660	3,00	>2,00	-	-
13+530	4,50	>2,00	-	-
13+880	2,5 /3,00	>2,00	-	-
13+930	2,50	>2,00	-	-
15+470	2,20	>2,00	-	-
15+650	13,00	» 3,00	5,29	1,5
16+110	10,00	»3,00	4,77	1,26
18+320	2,00	1,80	1,55	0,45
18+970	<1,80	2,00	1,4	0,41
19+680	2,50	2,50	2,06	0,6
20+155	7,80	1,40	1,2	0,38
20+360	6,50	-	4,02	1,08
22+940	4,00	-	3,1	0,9

A verde encontram-se representados os taludes identificados em campo como não sendo de risco

## 4.2 Aplicação do USMS

A etapa seguinte do processo de avaliação consiste em priorizar os taludes, identificados como podendo representar risco significativo (moderado e elevado) pela análise anterior, aplicando-se o sistema USMS – secção 2.3.2.1. Para a aplicação deste sistema classificativo foram avaliados os critérios que o compõem, tendo em consideração as características da via – secção 3.3.

Relativamente ao critério **Tráfego médio diário**, a qualificação dada teve em consideração a importância da via, que faz ligações internacionais no transporte de passageiros e de cargas. Na eventualidade de existirem blocos caídos na mesma, os comboios ficarão impedidos de circular. Por esta razão considerou-se a pontuação mais elevada (81 pontos). Por ser uma via com um traçado muito sinuoso e a velocidade máxima dos comboios estar compreendida entre os 90km/h e os 160km/h, a **Distância de visibilidade para decisão** apresenta-se muito limitada nos troços observados, pois àquelas velocidades o condutor não conseguirá travar atempadamente após avistar o obstáculo. Assim, para este critério, considerou-se igualmente a pontuação máxima.

Relativamente à **Impedância da via** só poderá ser considerada a na berma, aqui referida como vala de captação, ou em toda a via, visto que basta os blocos ocuparem um carril para que esta se torne intransitável, não havendo possibilidade dos comboios os contornarem. Por esse mesmo motivo, os **Danos na plataforma** só podem ser *Reduzidos*: não detetáveis, na eventualidade dos

blocos atingirem a vala de captação, ou *Extremos*: não contornáveis, quando estes atingem a via.

O **Risco médio para o veículo** é calculado como sugerido pelo RHRS de ODOT:

$$RMV (\%) = \frac{TMH \times \text{Comprimento do troço em risco (km)}}{\text{Velocidade limite da zona (km / h)}} \times 100 \quad 4.1$$

Onde:

*TMH* – Tráfego médio horário.

Para o RMV foram considerados os seguintes fatores:

- ✓ **TMH**: Este valor é igual a 2,6 e corresponde à circulação de uma média de 13 comboios num período de 6 horas no troço Guarda-Vilar Formoso, segundo a Direção Comercial e Desenvolvimento de Negócio da Infraestruturas de Portugal (IP, 2017);
- ✓ **Comprimento do troço em risco**: corresponde à extensão da zona mais crítica do talude;
- ✓ **Velocidade limite**: Entre as estações da Guarda e Cerdeira a velocidade máxima varia entre 120 e 160km/h. Entre Cerdeira e Vilar Formoso a velocidade máxima é entre 90 e 120 km/h. Para ambos os casos foi considerada a velocidade máxima possível nos troços em questão, ou seja, 160km/h para o primeiro caso e 120km/h para o segundo.

Este cálculo permitiu inferir que o RMV se apresenta inferior a 1%, pelo que, a pontuação atribuída no USMS foi de 3 pontos, representando um valor menor que 25%. O resultado obtido pode ser justificado pela circulação média horária dos comboios ser reduzida, apesar de esta ser uma via principal. Outra justificação pode ser devido ao facto do comprimento dos troços afetados ser reduzido quando comparado com o comprimento total do talude adjacente à via. Nos troços possíveis de afetar a via foi considerada a extensão da zona mais vulnerável a movimentos de massa no talude.

O **Fator económico** representa os desvios que o comboio terá que realizar em caso de obstrução da via e é obtido através das distâncias de desvio, para a estação ou apeadeiro, mais próximo, de via dupla. A identificação das estações com vias duplas e respetivas distâncias encontram-se devidamente caracterizadas na secção - 3.3 (Tabela 3.3 e Figura 3.5).

Tal como já referido, nos últimos 10 anos registaram-se vários acidentes na Linha da Beira Alta, sendo que pelo menos dois deles foram descarrilamentos causados por movimentos de massa (junho de 2013 e janeiro de 2016), embora sem vítimas, pelo que se considerou a ocorrência de 2 a 3 acidentes por ano. No apuramento da **Frequência de rotura** considerou-se como mais indicado para o estudo de caso o valor de uma vez nos últimos cinco anos.

A qualificação obtida em cada um dos critérios mencionados é comum a todos os taludes estudados, pois estes apresentam as mesmas características. Os restantes critérios, *Maciço rochoso*, *Impacto da rotura na via*, *Custos de manutenção/ano* e *Fator económico*, foram avaliadas consoante as particularidades de cada talude. Na Tabela 4.2 encontram-se identificadas, nas células a verde, as qualificações consideradas em cada um dos critérios da presente classificação, para o caso de estudo em referência.

**Tabela 4.2 – Pesos de cada critério considerados segundo o USMS**

<b>Critério / Peso</b>	<b>3 Pontos</b>	<b>9 Pontos</b>	<b>27 Pontos</b>	<b>81 Pontos</b>
<b>Maciço rochoso</b>	Boa captação de blocos de menores dimensões	Captação moderada para blocos de média dimensão	Captação limitada para blocos de maior dimensão	Sem captação para blocos de maior dimensão
<b>Tráfego médio diário</b>	< 5000	5000 a 20.000	20.000 a 40.000	> 40.000
<b>Distância de visibilidade para decisão</b>	Distância de visibilidade adequada	Distância de visibilidade moderada	Distância de visibilidade limitada	Distância de visibilidade muito limitada
<b>Impacto da rotura na via</b>	< 15m	15 a 60m	60 a 150m	Inadmissível
<b>Impedância da via</b>	Berma	½ da via	¾ da via	Toda a via
<b>Risco médio do veículo</b>	< 25% das vezes	25 a 50% das vezes	50 a 75% das vezes	> 75% das vezes
<b>Danos na plataforma</b>	Reduzidos: não detetável	Moderados: o condutor deve abrandar	Elevados: o condutor deve parar	Extremos: não contornável
<b>Frequência de rotura</b>	Sem rotura nos últimos 5 anos	1 vez nos últimos 5 anos	1 vez por ano	Mais do que uma vez por ano
<b>Custos de manutenção/ano</b>	< 4550€	4550€ a 9100€	9100€ a 45.500€	> 45.500€
<b>Fator económico</b>	Não requer desvios	Desvios curtos < 5 km	Desvios longos > 5 km	Acesso único, sem desvios
<b>Acidentes nos últimos 10 anos</b>	0 a 1	2 a 3	4 a 5	> 5

A aplicação do sistema USMS permitiu identificar os taludes que representam risco para a ferrovia, recorrendo aos dados recolhidos em campo e à análise dos registos fotográficos dos mesmos. Nesta classificação foram considerados taludes de risco aqueles cuja pontuação total seria  $\geq 350$  pontos. Devido à ausência de dados relativos a custos de manutenção dos taludes, não foi possível realizar a análise custo-benefício, condição necessária para a aplicação deste sistema. Por essa razão e tendo em conta a relevância da linha estudada, considerou-se que todos os taludes cuja pontuação final fosse  $\geq 350$  pontos apresentavam um fator custo-benefício  $> 1$ .

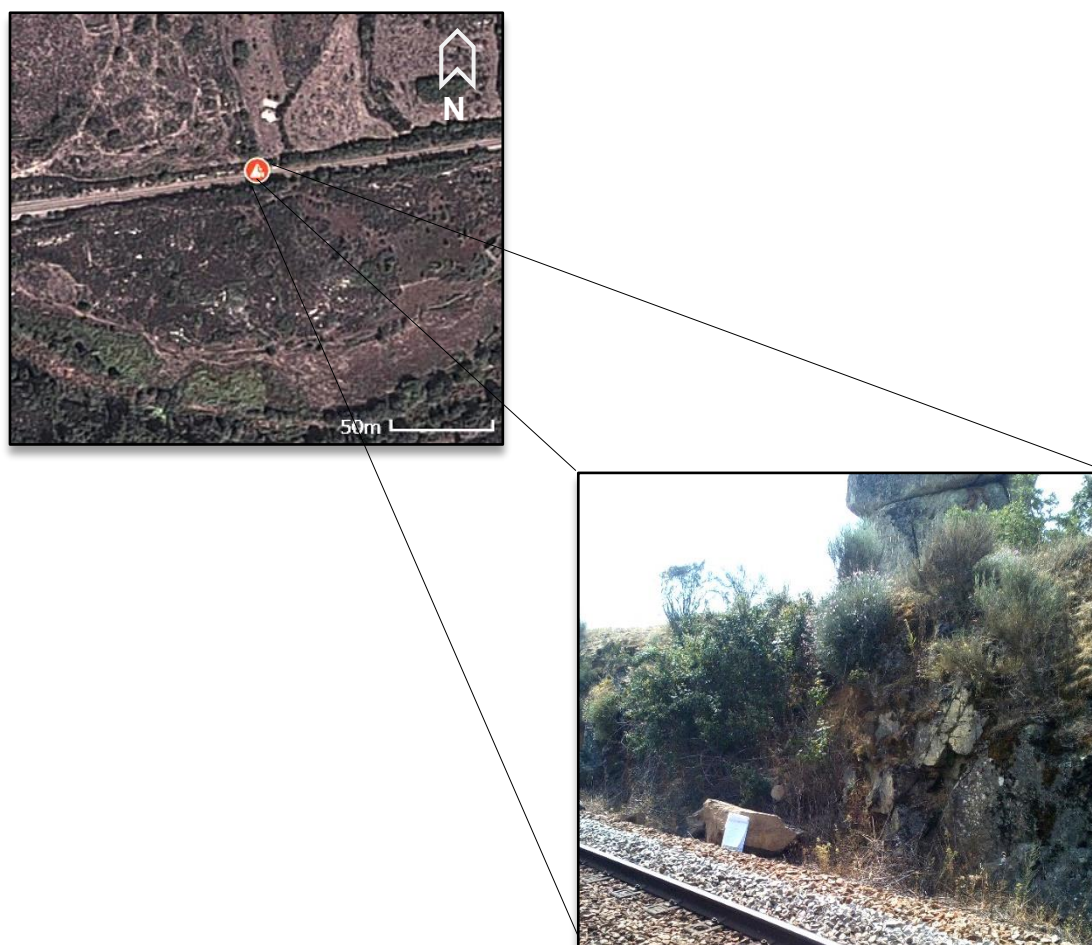
Durante a análise de campo, foram identificados alguns taludes já reabilitados. Contudo, as medidas adotadas foram indevidamente aplicadas -Tabela 4.4. Verificou-se a existência de malhas tipo malhassol, recomendadas para outro tipo de aplicação, como armadura do betão projetado. Verificou-se ainda, a presença de blocos soltos sobre os quais esta malha foi pregada, o que é indicativo da falta de saneamento da face do talude previamente à sua proteção com redes pregadas. Por se tratarem de taludes já reabilitados, não foi aplicado o sistema de classificação anteriormente mencionado. No entanto, sugerem-se algumas melhorias na secção 4.2.1.

Na Tabela 4.3 apresentam-se as pontuações totais obtidas com o sistema de classificação USMS dos taludes representativos de risco. Estes correspondem a aproximadamente 15% do total de taludes inventariados. No APÊNDICE II encontram-se as pontuações obtidas para todos os taludes analisados.

**Tabela 4.3 - Pontuações USMS obtidas para taludes de risco**

<b>Pk</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Pontuação USMS</b>
4+360	-	402
7+470	440	387
12+760	100	441
15+150	150	459
16+110	90	459
16+340 (LD)	120	459
16+340 (LE)	120	459
16+740	420	405
17+400 (LE)	60	459
17+400(LD)	60	459
18+080	25	459
20+155	205	459
20+360	100	459
20+480	450	459
20+960 (LD)	300	459
20+960 (LE)	300	459
22+940	360	459
23+330	80	459
23+450	60	405

Nas Figura 4.1 a Figura 4.13 ilustram-se os taludes indicados na tabela anterior, juntamente com a sua localização em vista satélite (*GoogleMaps, 2017*). Nestas figuras é possível observar características como: sistemas de descontinuidades, blocos instáveis, mecanismos de rotura, vegetação arbustiva densa e taludes muito próximos dos carris. É na conjugação desses fatores e outros originados por fenómenos naturais que surgem as instabilizações nos taludes e que, consequentemente, representam risco potencial para a via.

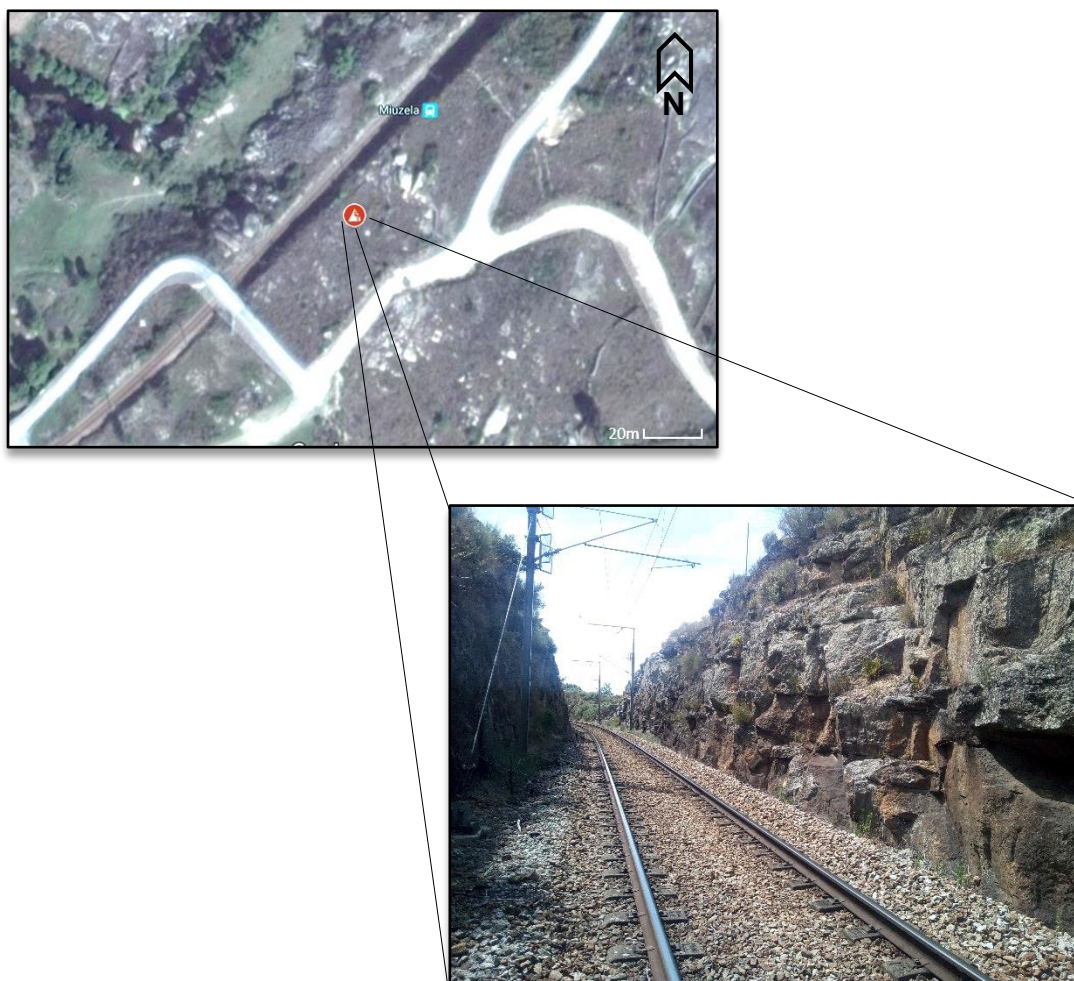


**Figura 4.1 – Talude em risco identificado ao Pk 4+360**



**Figura 4.2 - Talude em risco identificado ao Pk 7+470**



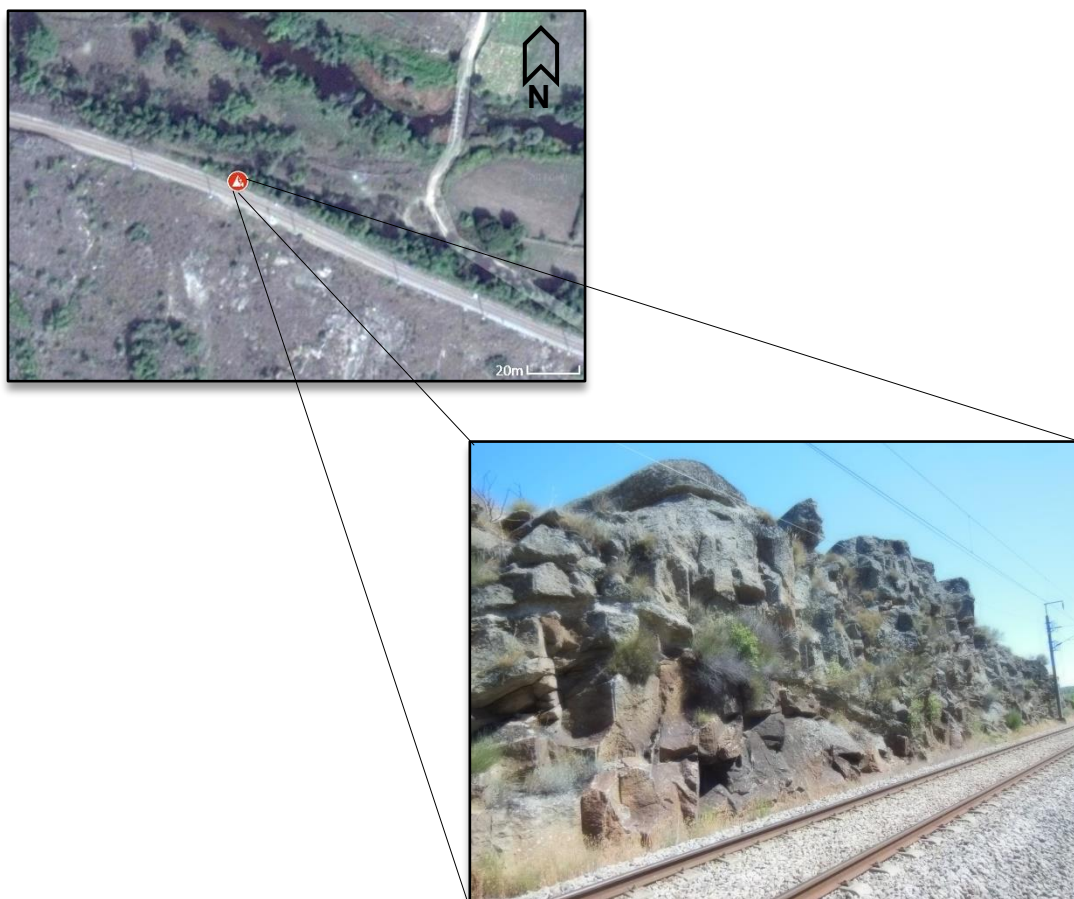


**Figura 4.3 - Talude em risco identificado ao Pk 12+760**

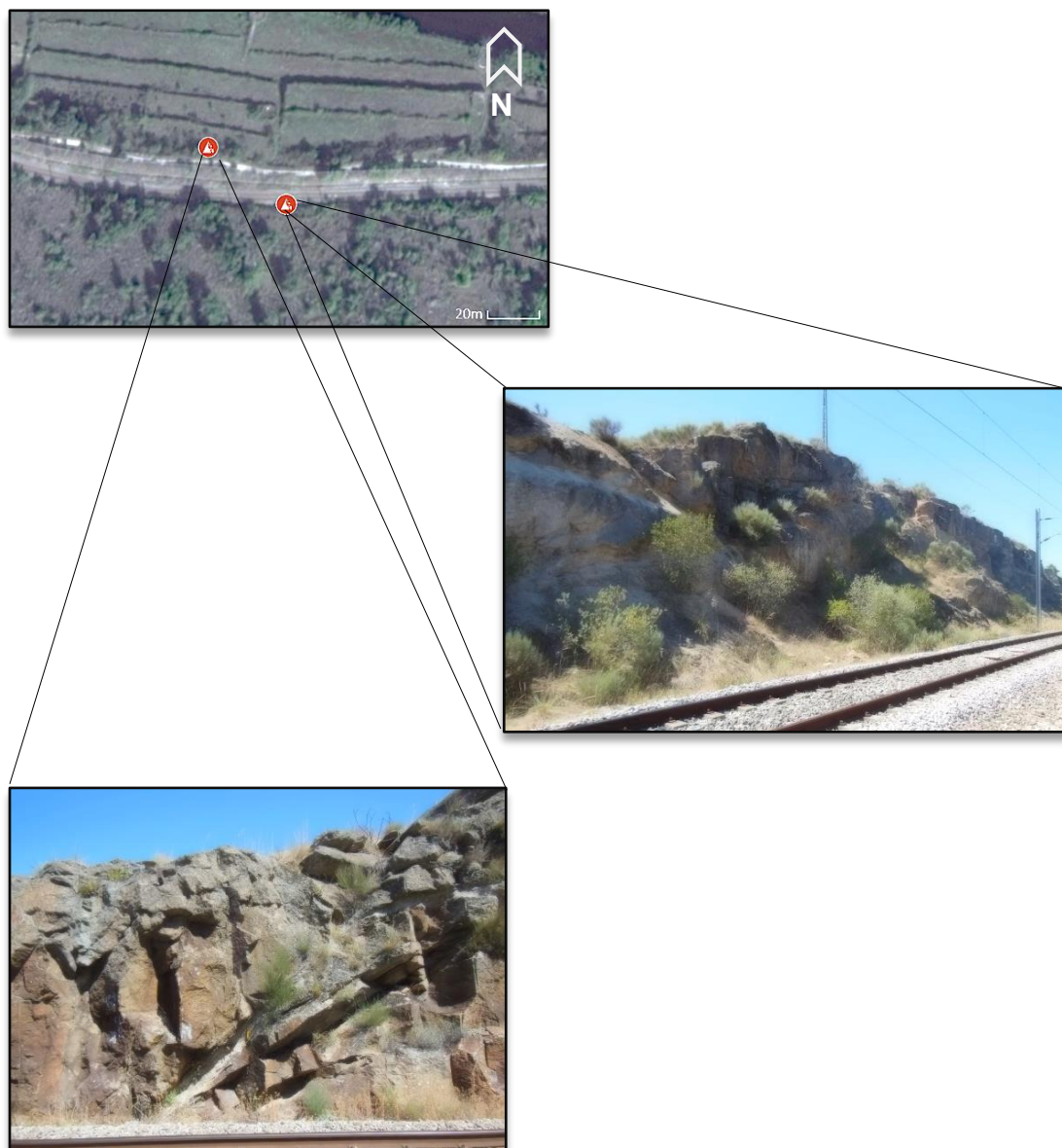


**Figura 4.4 - Talude em risco identificado ao Pk 15+150**





**Figura 4.5 - Talude em risco identificado ao Pk 16+110**

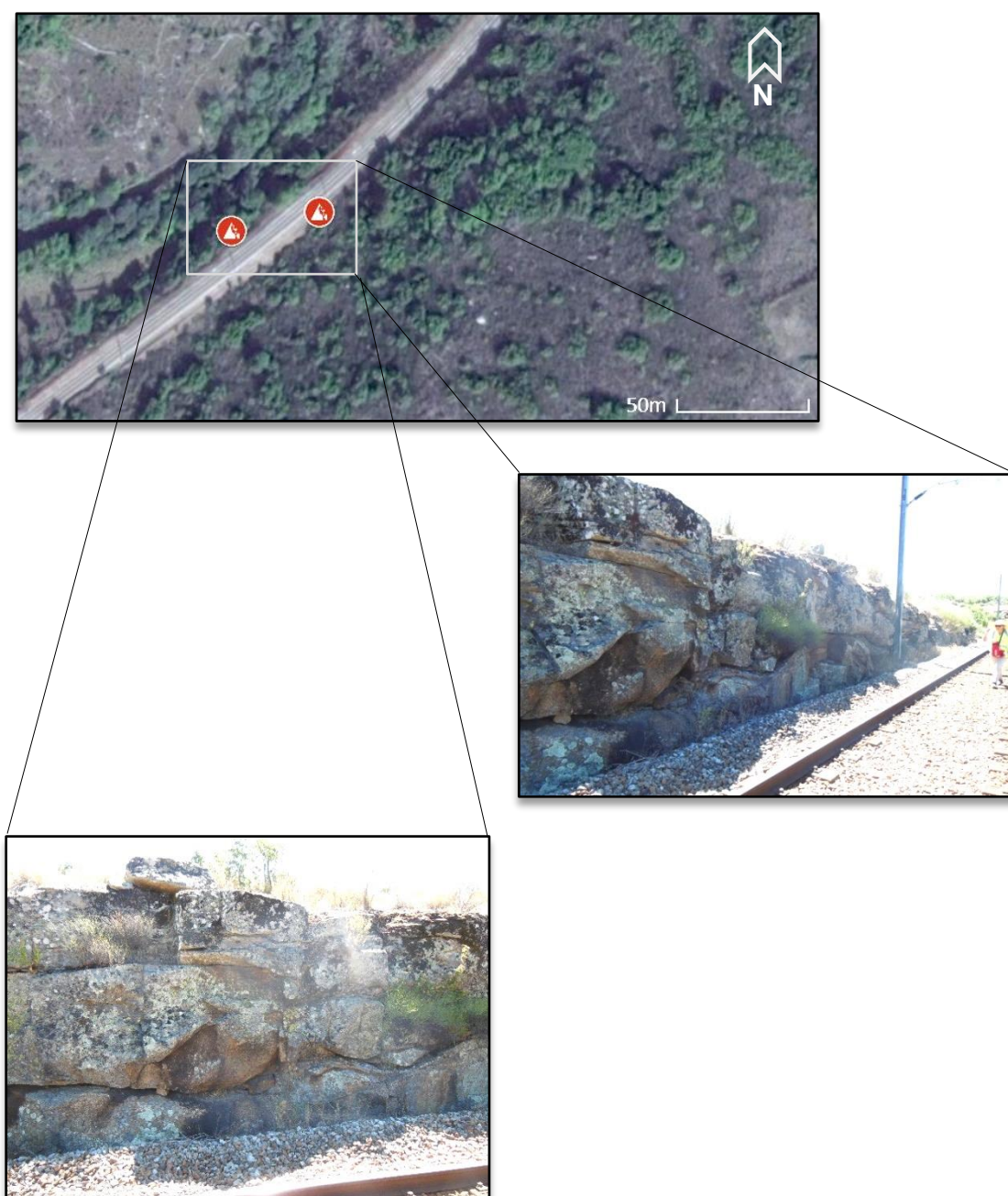


**Figura 4.6 - Talude em risco identificado ao Pk 16+340**



**Figura 4.7 - Talude em risco identificado ao Pk 16+740**

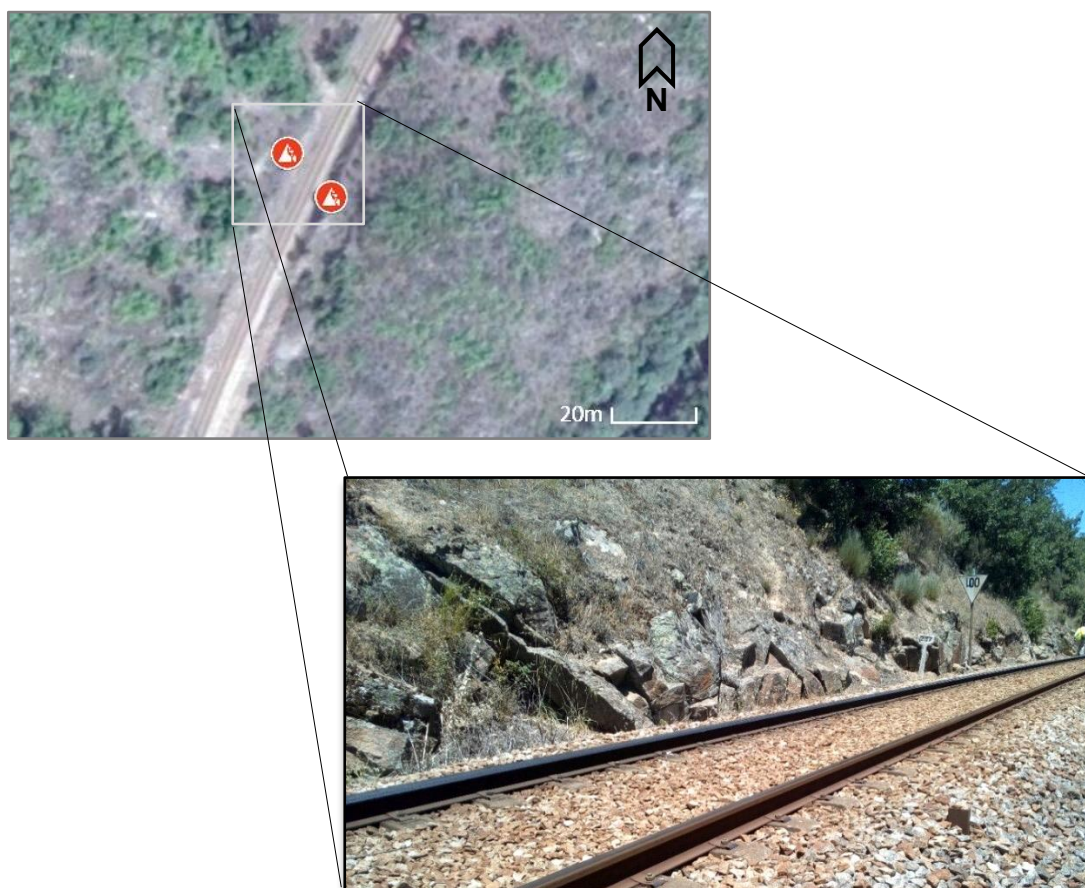




**Figura 4.8 - Talude em risco identificado ao Pk 17+400**



**Figura 4.9 - Talude em risco identificado ao Pk 18+080**



**Figura 4.10 - Talude em risco identificado ao Pk 20+155**



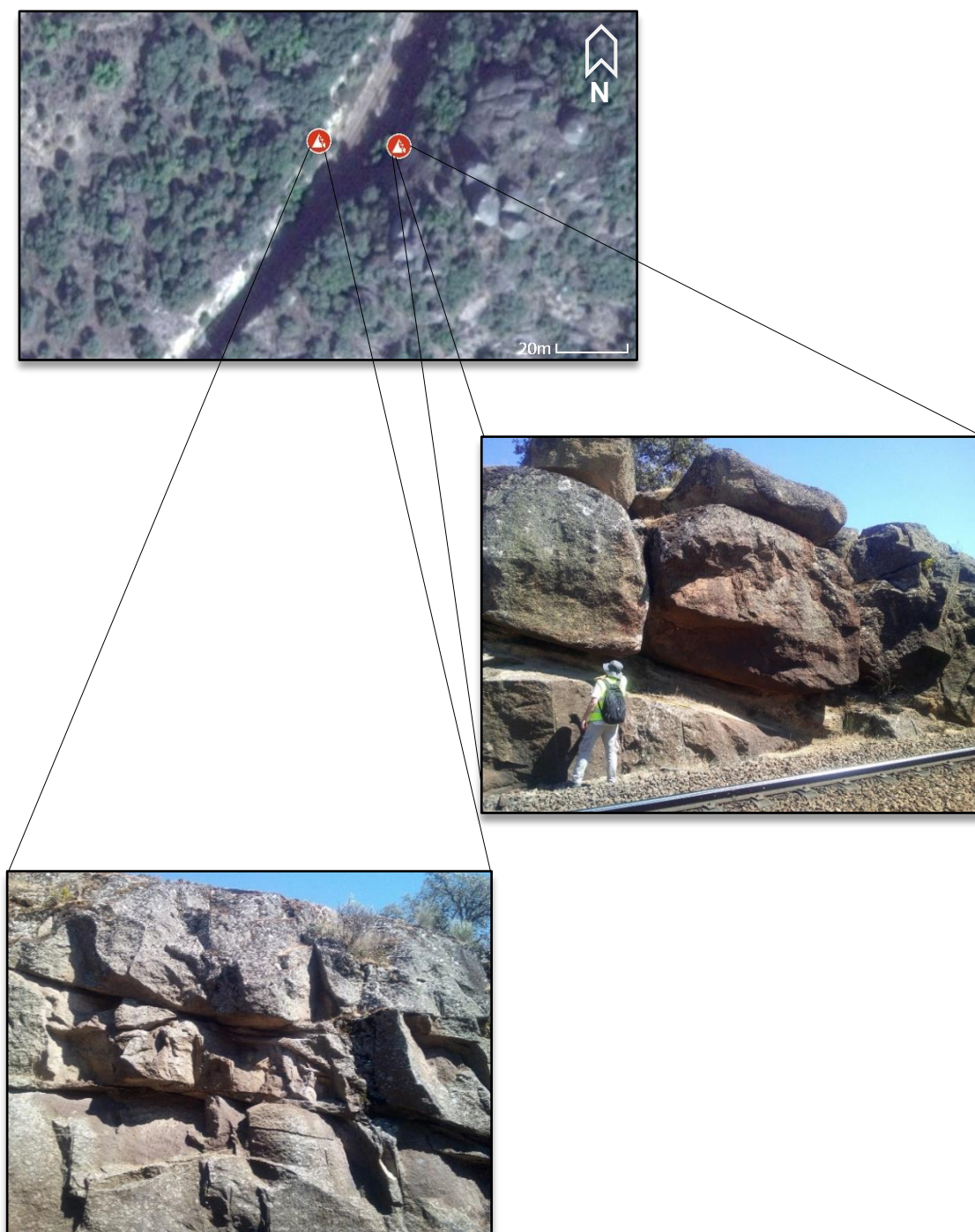


**Figura 4.11 - Talude em risco identificado ao Pk 20+360**






**Figura 4.12 - Talude em risco identificado ao Pk 20+960**





**Figura 4.13 - Talude em risco identificado ao Pk 23+330**

**Tabela 4.4 - Taludes com soluções de reabilitação indevidamente aplicadas**

Pk	Aspeto
18+840	
22+360	 

#### 4.2.1 Soluções de estabilização

Nesta secção sugerem-se as medidas de estabilização dos taludes analisados de acordo com as características específicas de cada um, em resposta aos níveis de risco identificados na secção 4.2.

Para a sugestão de medidas de reabilitação recorreu-se ao SMR, que é obtido através do  $RMR_{básico}$  e dos fatores de ajuste relacionados com as orientações dos taludes (Tabela 3.2) e das respetivas descontinuidades.

Na Tabela 4.5 encontram-se apresentados os pesos dos parâmetros considerados no cálculo do  $RMR_{básico}$  para os taludes considerados de risco e os valores deste índice, juntamente com as respetivas classes. De acordo com os dados obtidos nessa tabela é possível concluir que o  $RMR_{básico}$  classifica os maciços dos taludes como de qualidade muito boa a boa, encontrando-se inseridos nas classes I e II, respetivamente.

Na Tabela 4.6, apresentam-se os valores de SMR obtidos para os mesmos taludes e respetivas classes de descrição. Visto que muitos dos taludes analisados apresentam mais do que uma família de descontinuidades, os cálculos do SMR foram aplicados a cada uma das famílias, de modo a obter todas as possibilidades de reabilitação existentes e, assim, tentar adotar a medida correspondente ao nível de maior potencial de instabilização, que corresponde ao menor valor de SMR obtido.

Através da análise da Tabela 4.6 é possível verificar que muitos dos taludes se encontram completamente estáveis, não evidenciando qualquer tipo de rotura, pelo que nestes casos é sugerido apenas o reperfilamento da face, por remoção de alguns blocos (classe I). Para os taludes inseridos na de classe II, e que se encontram estáveis, sugerem-se algumas medidas que incluem, igualmente, o reperfilamento, o reforço com betão ou a realização de inclusões (ancoragens passivas). Dependendo do valor de SMR, são sugeridas ou não as medidas de reforço, isto é, para valores próximos do limite superior do intervalo estas medidas não são propostas por Romana et al., 2003, já para valores próximos do limite inferior são consideradas como medidas minimizadoras a aplicar.

Os taludes inseridos na classe III caracterizam-se como parcialmente estáveis, podendo surgir pequenas roturas planares ou roturas de grande dimensão por cunha. As medidas minimizadoras propostas para os taludes inseridos nesta classe passam pelo reforço (com betão ou inclusões) e pela proteção. Os taludes identificados como pertencentes à classe IV apresentam potencial de instabilidade, representando pior condição em relação aos anteriormente descritos. Por essa razão, sugerem-se medidas de reforço (com betão ou inclusões), de drenagem e de correção. Aconselha-se ainda a aplicação de um suporte corretivo.

As soluções de estabilização dos taludes, referidas anteriormente, englobam um conjunto de medidas que se encontram descritas na Tabela 2.8. Dessas medidas devem ser adotadas aquelas que mais se adequam às condições de cada talude.

Tabela 4.5 – Peso dos parâmetros utilizados no cálculo do RMR<sub>básico</sub>

Pk	Peso dos parâmetros para o cálculo do RMR <sub>básico</sub>					RMR	Classe
	Resistência da rocha intacta	RQD	Espaçamento das descontinuidades	Condições das descontinuidades	Percolação de água		
4+400	12	20	10	18	15	75	II
7+470	12	17	15	20	15	79	II
12+760	12	20	15	18	15	80	II
15+150	12	20	15	18	15	80	II
15+650	12	20	15	15	15	77	II
16+110	12	20	10	16	15	73	II
16+340	12	20	15	18	15	80	II
16+340	12	20	15	12	15	74	II
16+740	12	20	15	12	15	74	II
17+400	12	20	20	15	15	82	I
17+400	12	20	20	15	15	82	I
19+680	12	20	15	12	15	74	II
20+155	12	20	15	17	15	79	II
							II
							II
20+155							II
18+840	12	20	15	17	15	79	II
20+480							II
20+960							II
20+960							II
23+330	12	20	15	17	15	79	II
23+330							II
23+450							II

**Tabela 4.6 – Valores de SMR e medidas minimizadoras sugeridas por Romana et al. (2003)**

<b>Pk</b>	<b>Família de fraturas</b>	<b>SMR</b>	<b>Classe</b>	<b>Estabilidade</b>	<b>Tipo de rotura</b>	<b>Medidas minimizadoras</b>
4+400	1	66	II	Estável	Alguns blocos	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Sem suporte
	2	41	III	Parcialmente estável	Pequenas planares ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões)
7+470	1	63	II	Estável	Alguns blocos	Reforço (com inclusões); Proteção; Sem suporte
	2	80	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	3	36	IV	Instável	Planar ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Drenagem
12+760	1	81	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	2	46	III	Parcialmente estável	Pequenas planares ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Proteção
	3	87	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
15+150	1	63	II	Estável	Alguns blocos	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Sem suporte
	2	79	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	3	86	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
15+650	1	78	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	2	35	IV	Instável	Planar ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Drenagem
16+110	1	77	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	2	77	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	3	39	IV	Instável	Planar ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Drenagem
16+340	1	84	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	2	84	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	3	46	III	Parcialmente estável	Pequenas planares ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Proteção

**Tabela 4.6 – Valores de SMR e medidas minimizadoras sugeridas por Romana et al. (2003) (continuação)**

<b>Pk</b>	<b>Família de fraturas</b>	<b>SMR</b>	<b>Classe</b>	<b>Estabilidade</b>	<b>Tipo de rotura</b>	<b>Medidas minimizadoras</b>
16+340	1	78	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
16+740	1	78	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	2	62	II	Estável	Alguns blocos	Reforço (com inclusões); Proteção
17+400	1	89	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	2	81	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
17+400	1	89	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	2	81	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
19+680	1	61	II	Estável	Alguns blocos	Reforço (com inclusões); Proteção
	2	77	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
20+155	1	78	II	Estável	Alguns blocos	Sem suporte
	2	27	IV	Instável	Planar ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Drenagem; Correção
	3	83	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
20+155	1	80	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
	2	37	IV	Instável	Planar ou grandes por cunha	Reforço (com betão); Reforço (com inclusões); Drenagem
20+960	1	83	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
20+480						
20+960	2	83	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
20+960						
23+330	1	83	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
23+330	2	86	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte
23+450	3	81	I	Completamente estável	Nenhum	Sem suporte

#### 4.2.2 Discussão das soluções de estabilização sugeridas

Tendo em conta as medidas de estabilização sugeridas por Romana et al., 2003 em função de cada índice SMR, pretende-se apenas selecionar aquelas que sejam as mais indicadas, isto é, as que se consideram economicamente viáveis tendo em conta as condições de instabilização de cada talude.

Os custos das medidas finais a adotar nesta secção, têm em consideração as estimativas orçamentais de projetos anteriores cedidas pela empresa TPF Planege Cenor. Por esse motivo, é feita uma análise comparativa entre as diversas medidas propostas, não sendo, por isso, divulgados os valores de custo das mesmas.

Das soluções de estabilização sugeridas com base no índice SMR, as mais indicadas para o caso de estudo são as de reperfilamento, de proteção e de drenagem. Uma outra medida, igualmente importante e que no entanto não se inclui nas medidas sugeridas, é a de saneamento da face e da crista do talude, de modo a remover os blocos soltos e a vegetação mais densa, que podem potenciar a instabilização dos taludes. Na Tabela 4.7 diferenciam-se os tipos de vegetação presentes em alguns dos taludes de risco analisados.

**Tabela 4.7 – Taludes com vegetação na face ou na crista**

Pk	Vegetação	
	Arbustiva	Arbórea
4+360	√	
7+470	√	
12+760	√	
15+150	√	
16+260	√	
16+340	√	
18+080	√	√
20+155		√
20+360	√	
20+960	√	

Nas **soluções de proteção** recomenda-se a aplicação de redes metálicas estáticas, que se aplicam na face do talude e que requerem trabalhos mínimos de tratamento e regularização da superfície do talude, devido à sua capacidade para se moldarem às superfícies irregulares (Santos, 2014). Estas apresentam custos de fornecimento, de transporte e de execução reduzidos. Outra medida de proteção possível são as redes dinâmicas de captação, que se tornam impraticáveis no caso das ferrovias, pois necessitam de estar a uma certa distância do sopé do talude, de modo a capturarem os blocos que possam vir a atingir a ferrovia. Na maioria

dos casos não é possível aplicar as redes dinâmicas de captação pois a ferrovia encontra-se muito próxima dos taludes - Figura 4.3. Relativamente às valas de captação, igualmente consideradas como uma medida de proteção, foram observadas ao longo dos taludes adjacentes às ferrovias. No entanto, estas não apresentavam as dimensões adequadas para reter os blocos e nem é possível proceder ao seu alargamento, dada a limitação de espaço entre o sopé dos taludes e a ferrovia.

As **medidas de drenagem** são fundamentais no que diz respeito aos taludes pois permitem o escoamento das águas, tanto superficiais como subterrâneas. Alguns dos taludes observados apresentavam valetas drenantes de plataforma, não apresentando qualquer outro sistema de drenagem. Assim, sugere-se a aplicação de sistemas como as valetas de crista, descidas de água ou escadas de água que, para além da sua fácil execução, são pouco dispendiosas. Recomenda-se, ainda, a manutenção das valetas de plataforma que em muitos dos casos se encontram obstruídas pelo solo de cobertura dos taludes ou pelo balastro da própria ferrovia.

Uma solução igualmente viável é o **reperfilamento** dos taludes, que consiste na alteração da sua morfologia e na regularização da sua face, removendo os blocos que se encontrem em destaque e diminuindo a sua inclinação. Esta torna-se uma medida menos dispendiosa, quando comparada com as anteriormente referidas, pois pode ser efetuada com recurso a equipamentos leves ou até mesmo manuais.

O **reforço com betão** (betão projetado, de preenchimento e recalçamento, vigas e/ou contrafortes ou muros no sopé) não é uma das soluções mais indicadas para os taludes analisados, uma vez que envolve equipamentos que acarretam custos consideráveis no seu transporte e na execução da técnica. Para além disso, é evidente a dificuldade de acesso a esses taludes, pelo que não é compensatório usar este tipo de reforço, na medida em que, ao longo da ferrovia, o número de taludes que necessita deste tipo de reparação é muito reduzido. Dos taludes analisados, que necessitariam deste tipo de reforço, identificou-se o talude do lado direito ao Pk 23+330 - Figura 4.13. Contudo, esta é uma alternativa com custos inferiores às medidas de **reforço com recurso a inclusões**, como é o caso das ancoragens. Em relação às ancoragens ativas, estas acarretam custos de aplicação cerca de duas vezes superiores à aplicação do betão e envolvem ainda custos associados à instrumentação e à inspeção das mesmas, como é o exemplo das células de carga. Relativamente às pregagens (ancoragens passivas), estas revelam maior rapidez e simplicidade de execução, quando comparadas com as ancoragens ativas, recorrendo a equipamentos ligeiros. Para o caso da reabilitação de taludes, a estas pregagens estão associadas as redes metálicas de alta resistência que contém os blocos presentes na superfície do talude, enquanto que as pregagens têm um efeito de estabilidade global, isto é, contém os blocos de maior dimensão originados pelos diferentes mecanismos potenciais de rotura.

Na Tabela 4.8 referem-se as medidas que se consideraram as mais indicadas para o troços estudados, bem como daqueles que já se encontrariam reabilitados, tendo em conta a sua



instabilização e a medida mais indicada para promover a sua estabilização. A aplicação destas medidas pode requerer uma segunda análise ao campo, uma vez que foram sugeridas com base em métodos expeditos e num intervalo de tempo muito limitado, correspondendo ao cenário mais crítico a que os taludes podem estar sujeitos.

**Tabela 4.8 – Soluções de estabilização sugeridas para os taludes analisados**

Pk	Medidas sugeridas	Medidas sugeridas pela empresa
4+400	Saneamento da face e da crista do talude: remoção dos blocos instáveis e desmatação (vegetação arbustiva)	Nenhuma medida prevista para o troço
7+470	Saneamento da face e da crista do talude: remoção dos blocos instáveis e desmatação (vegetação arbustiva)	Nenhuma medida prevista para o troço
12+769	Regularização da face do talude e aplicação de redes metálicas	Saneamento de blocos soltos e desmatação, regularização da face do talude, aplicação de redes metálicas e sistemas de drenagem
15+150	Limpeza dos blocos e desmatação (vegetação arbustiva) e aplicação de valetas de crista e redes metálicas.	
16+110	Saneamento dos blocos na crista do talude; regularização da face do talude; valetas de drenagem de crista e descida de água; redes metálicas	
16+340	Desmatação e limpeza de blocos soltos; Valeta de crista e descida de água	Limpeza de blocos soltos
16+740	Regularização da face do talude	Aplicação de redes metálicas pregadas até ao Pk 233+380
17+400	Remoção de blocos soltos na crista do talude	Nenhuma medida prevista para o troço
17+400		
18+080	Talude afastado da via pelo que não se prevê nenhuma medida	Nenhuma medida prevista para o troço
18+840	Remover redes malhassol anteriormente aplicadas e sanear os blocos soltos e a vegetação; Regularização da face do talude; Aplicação de redes metálicas pregadas	Remoção da malhassol existente e aplicar redes pregadas de forma apropriada
20+155	Desmatação e arranque de árvores; Redes metálicas; Valetas de crista e descidas de água	Sem informações sobre o troço
20+155	Desmatação (vegetação arbórea), regularização da face do talude, valeta de crista e descidas de água e redes metálicas	
20+360	Desmatação (vegetação arbustiva e arbórea), regularização da face do talude e valeta de crista e descidas de água	Reperfilamento das zonas de falha e remoção de blocos soltos nas restantes zonas
20+480		
20+960		
20+960		
22+360	Remover malhassol existente e sanear os blocos soltos e a vegetação; Regularização da face do talude e aplicação de redes metálicas pregadas	Reperfilamento nas zonas de alteração e remoção de blocos soltos
23+330	Remoção de blocos soltos na crista do talude (LD); Saneamento e adoçamento da face do talude (LE)	Reforço dos blocos em consola (LD)
23+330		
23+450		



## 5. Considerações finais e trabalhos futuros

O presente estudo teve como finalidade analisar a problemática que os taludes representam para as infraestruturas viárias, particularmente as ferrovias, causada pelos diferentes mecanismos potenciais de instabilização, de modo a sugerir as soluções de estabilização mais indicadas aos mesmos. Para o efeito, analisaram-se 129 taludes ao longo duma ferrovia no norte do país, num trecho da linha da Beira Alta, que liga Guarda a Vilar Formoso. Esta avaliação foi realizada com recurso ao sistema de classificação empírico USMS, aplicado originalmente a rodovias, ainda pouco usado em Portugal.

A metodologia de trabalho adotada no presente estudo baseou-se essencialmente em três etapas: recolha bibliográfica, trabalho de campo e trabalho de gabinete.

Numa fase prévia procedeu-se à recolha bibliográfica de alguns elementos como: os tipos de movimentos de massa mais recorrentes em taludes rochosos de escavação e os parâmetros que os descrevem, segundo a ISRM (1978; 1980) – secção 2.3.1. Foram igualmente recolhidas informações sobre os diferentes sistemas classificativos aplicados em taludes adjacentes a infraestruturas viárias, de forma a seleccionar o mais adequado para o caso de estudo – secção 2.3.2. Adicionalmente, recolheram-se algumas informações no que respeita às medidas de mitigação mais utilizadas para esses mesmos taludes, de modo a reduzir os níveis de risco elevados para níveis toleráveis. Estas medidas dividem-se em reperfilamento, reforço, proteção e drenagem. A elas podem encontrar-se associados os geossintéticos, funcionando como uma medida complementar e não representando por si só uma medida de mitigação – ver secção 2.4.

Esta etapa envolveu, também, a pesquisa de informações geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas da zona de estudo, o que implicou a consulta de cartas militares, geológicas e respetivas notícias explicativas. Foram ainda solicitadas às entidades envolvidas IP e IMT, informações sobre a ferrovia, tais como as velocidades limite no trecho estudado, o tráfego médio horário e o número de acidentes nos últimos dez anos. Estas informações expõem-se no Capítulo 3.

Na etapa de reconhecimento de campo, caracterizou-se a geometria, a geologia e a geotecnia dos taludes de escavação rochosos ocorrentes, utilizando os métodos descritivos, anteriormente referidos. Esta caracterização incluiu ainda um ensaio expedito *in situ* – ensaio com o esclerómetro, de modo a avaliar a dureza ao ressalto dos maciços rochosos e, a partir dela estimar a RCU. Para esses taludes foram ainda analisados fatores como: a presença de vegetação, o estado dos sistemas de drenagem, a presença de blocos soltos ou em consola e os possíveis mecanismos instabilizadores. Foi igualmente realizada uma caracterização da ferrovia, analisando as condições das valas de captação.

Concluído o reconhecimento de campo, realizou-se o tratamento dos dados recolhidos, com o auxílio dos registos fotográficos obtidos dos taludes. Desenvolveu-se a análise dos sistemas de

descontinuidades e dos taludes, com o *software DIPS 5.0*, determinando-se a sua orientação preferencial. Para os taludes, esta varia de NE-SW a NW-SE, dada a sinuosidade do traçado da linha férrea. As respetivas inclinações são sub-verticais (*Dip* de 86°). Quanto às descontinuidades, as suas inclinações alternam entre sub-verticais e sub-horizontais, *Dip* 80° e 12°, respetivamente, e as suas direções são igualmente variáveis (N50-60°E, N40-50°E e N40-50°W) - ver secção 3.4.2.1.

Os valores de RCU obtidos (Tabela 3.4) encontram-se inseridos na gama de valores de referência para rochas graníticas, [50 – 300 MPa], o que vai de encontro com estudos realizados por diferentes autores. Contudo, foi obtido um valor de 35MPa, que se encontrava abaixo do valor mínimo do intervalo de referência, o que pode indicar um grau de alteração maior para essas rochas em relação às restantes, ou que pode ser devido a uma deficiente leitura devido ao facto do martelo utilizado ser indicado para rochas mais duras.

A análise de risco realizada aos taludes foi dividida em duas fases: na primeira fase foram eliminados os taludes que cumpriam os critérios de dimensionamento das valas de captação de acordo com o ábaco de Ritchie (Tabela 4.1). Este ábaco correlaciona a altura e a inclinação do talude e sugere uma largura e profundidade ideais para essas valas. Na segunda fase foi aplicada a classificação USMS, desenvolvida pelo WSDOT, que avalia e gere o risco que um determinado talude representa para a via. Esta classificação consiste na atribuição de pontuações (3,9,27,81) a onze fatores que caracterizam o talude e a via (Tabela 2.17), e que envolve uma análise de custo-benefício relacionada com as manutenções efetuadas aos taludes durante um determinado período de tempo. Os taludes cujas pontuações eram  $\geq 350$  classificaram-se como de risco e procedeu-se à sua análise detalhada (Tabela 4.3). Para a aplicação deste sistema de classificação, consideraram-se nos diferentes critérios, as condições que representariam maior perigo para a ferrovia - ver secção 4.2. Do total de taludes analisados, cerca de 38% foram considerados não perigosos, dos quais 13% cumpriam os critérios de dimensionamento e 25% foram identificados em campo como não perigosos por se encontrarem muito afastados da via ou por terem uma altura inferior a 3,0m e sem evidências de instabilização. Os taludes considerados de risco, segundo o USMS, correspondem a aproximadamente 15% do total de taludes inventariados.

Em seguida calculou-se o SMR para aqueles taludes que representavam perigo para a ferrovia, de modo a obter um conjunto de soluções de reabilitação aplicáveis às condições dos taludes analisados (Tabela 4.6). Para o cálculo do índice SMR foi necessário calcular o RQD e caracterizar as descontinuidades, de modo a proceder ao cálculo do  $RMR_{\text{básico}}$  (Tabela 4.5). O valor final do  $RMR_{\text{básico}}$ , juntamente com alguns fatores de ajuste relacionados com as orientações do talude e das descontinuidades, permitiram obter um valor para o índice de SMR.

O índice RQD foi obtido de forma gráfica (Figura 2.2), com base em estudos expeditos, apenas baseados no reconhecimento de campo. Este índice possibilitou classificar as rochas como boas a excelentes, apresentando, desta forma, uma qualidade elevada (APÊNDICE II -Tabela II.c).

Relativamente ao SMR, os taludes estudados inserem-se nas quatro primeiras classes (I, II, III e IV) e descrevem os maciços dos taludes com potencial risco de regulares a muito bons. A cada uma das classes obtidas associa-se um tipo de rotura potencial, suporte e estabilidade.

Face a esta descrição sugerem-se, com base no recomendado por Romana et al (2003), algumas medidas minimizadoras que envolvem medidas de correção, de drenagem (profunda ou superficial), de reforço (com inclusões ou betão), de proteção e de reperfilamento (Tabela 2.8).

Estas soluções de estabilização são as que resultaram como mais aconselháveis, uma vez que são mais económicas quando comparadas com as medidas alternativas de reforço. Uma medida preventiva, e igualmente importante neste caso, que não se encontra contemplada nas soluções sugeridas por Romana et al (2003), inclui o saneamento de blocos e da vegetação arbórea e arbustiva mais densa observada em alguns taludes (Tabela 4.7).

Das medidas de proteção sugeridas, as redes metálicas estáticas são uma opção exequível, que apesar de requererem trabalhos de saneamento, não deixam de acarretar custos cerca de duas a três vezes inferiores aos da aplicação de soluções de reforço com betão. Relativamente às valas de captação, que são igualmente medidas de proteção, já se encontram em muitos dos taludes observados, contudo, muitas delas não apresentam as dimensões ideais para a eficaz captação dos blocos, pelo que se tornam uma solução ineficiente. As redes metálicas dinâmicas são pouco exequíveis porque necessitam de ser instaladas a uma certa distância do sopé dos taludes, o que às vezes é difícil, devido à reduzida distância até aos carris.

Devido à existência apenas de valetas de drenagem no sopé do talude, o que não representa um sistema de drenagem totalmente eficaz, propõe-se a aplicação de sistemas de drenagem adicionais, como as valetas de crista ou as descidas de água. Este melhoramento dos sistemas de drenagem pode impedir potenciais fenómenos de instabilização.

O reperfilamento é uma medida que visa regularizar ou suavizar a inclinação dos taludes, removendo os blocos que se encontrem mais salientes, conferindo mais estabilidade aos taludes através da redistribuição das forças originadas pelo peso do terreno. Esta é das medidas mais económicas por requerer apenas equipamentos leves ou, até mesmo, manuais.

As medidas de reforço tornam-se mais dispendiosas quando comparadas com as anteriores, na medida em que os custos de fornecimento, transporte e execução dos elementos de reforço, como as inclusões é muito superior atingindo, no caso das ancoragens ativas, um valor aproximadamente de três a quatro vezes superior ao da aplicação de redes metálicas, implicando ainda custos de instrumentação e fiscalização.

O reforço com betão, tal como as medidas de reforço com inclusões, envolve o transporte de equipamentos até à ferrovia, que neste caso constitui uma dificuldade, dado o difícil acesso à via, tornando estas soluções mais dispendiosas. Outra desvantagem desta medida de reforço, deve-se ao facto de existirem poucos taludes que necessitem destas medidas, como é o caso

do talude do lado direito ao Pk 23+330 (Figura 4.13), não compensando todos os custos relacionados com a mobilização da logística associada a esta técnica.

As soluções de estabilização propostas na presente dissertação poderão requerer uma segunda visita ao campo, de modo a obter a sua validação, tendo em conta que estas foram definidas com base num levantamento desenvolvido num intervalo de tempo muito limitado.

Finalmente, uma breve reflexão no que diz respeito à eficácia do sistema de classificação aplicado - USMS. É possível afirmar que este identifica objetivamente os taludes que representam risco para as infraestruturas viárias, uma vez que as análises realizadas nos reconhecimentos de campo confirmam as situações de risco obtidas pela classificação. Isto é, os taludes que aparentavam risco potencial no campo, correspondem aos taludes cujas pontuações, obtidas por aplicação do USMS, são  $\geq 350$ , uma das condições necessárias para que estes taludes sejam considerados de risco e cuja reabilitação deva ser avaliada, bem como devam ser objeto de monitorização futura. Por ser um sistema de carácter empírico, baseado numa análise qualitativa e seletiva, a sua aplicação foi adequada no âmbito do caso de estudo, tanto mais que o reconhecimento de campo também se baseou numa análise do mesmo tipo.

Relativamente às limitações encontradas no presente estudo, refere-se a ausência de dados relativos aos custos de manutenção dos taludes, o que não permitiu a realização de uma análise custo-benefício, necessária para a aplicação integral da classificação USMS, pelo que se optou por considerar que esta conduziria a valores  $>1$  para os taludes cuja pontuação fosse  $\geq 350$ . Outra limitação deve-se ao difícil acesso à via, que não permitiu avaliar alguns trechos, nomeadamente entre o Pk 10+560 e o Pk 13+560, uma vez que não foi possível retornar à mesma zona e, consequentemente, não foram propostas medidas de estabilização para esses taludes.

Para trabalhos futuros recomenda-se a aplicação de outros sistemas de classificação, da mesma natureza, para o trecho estudado, de modo a obter um novo conjunto de soluções e compará-las com as propostas no presente estudo. Propõe-se, ainda, a conceção de um sistema de classificação de taludes direccionado para ferrovias, tendo em conta as limitações que estas representam relativamente às rodovias, com base no USMS e no conhecimento específico das Infraestruturas de Portugal, permitindo assim adaptar os valores dos diferentes critérios envolvidos nesse sistema.

Sugere-se, ainda, a criação de uma base de dados, acessível a nível nacional, com os taludes inventariados, e respetivas características, onde também se deverá incluir os movimentos de instabilização registados anteriormente e as ações de manutenção implementadas nos taludes da região, para consulta em trabalhos futuros semelhantes e futuras monitorizações.

## Referências bibliográficas

- ABCB - Australian Building Codes Board. (2015). *Landslide Hazards Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. Canberra: Australian Government and States and Territories of Australia. Vol. 2, 1-40
- AGS - Australian Geomechanics (2007a). *Landslide Risk Management*. Journal and News of the Australian Geomechanics Society. Vol. 42(1), 159–182
- AGS - Australian Geomechanics (2007b). *Landslide Risk Management*. Journal and News of the Australian Geomechanics Society Vol., 42(1), 1–53
- Altiplano (2014). Soluções de estabilização de taludes contra queda de materiais. Obtido 10 de Agosto de 2017, de <http://altiplanotec.com.br/>
- APgeotecnia (2012). Artur Peixoto consltores geotecnia. Obtido 14 de Setembro de 2017, de <http://www.apgeotecnia.pt/geotechnics/injections.html>
- ASTM D 6032-96 (2008) Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core, American Society for Testing Materials International, West Conshohocken, PA.
- Ayala, F. J. (1987). *Manual de Taludes* - Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (J. Ortiz & L. Vallejo, Eds.). Ministerio de Industria y Energia.
- Azzoni, A., La Barbera, G., & Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.* Vol.32(7), 159-182.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287–332
- Bathurst, R. (2007). *Geosynthetic Functions*. International Geosynthetic Society, 1–2.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: Wiley-Interscience
- Bozzolo, D., Pamini, R., & Hutter, K. (1988). Rockfall analysis - A mathematical model and its test with field data. *Proc. 5th Intl symposium on Landslides, Lusanne*, 555-560
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads - *Natural Hazards and Earth System Sciences* Vol. 4, pp. 71–81
- Budetta, P., & Panico, M. (2002). Il metodo «Rockfall Hazard Rating System» modificato per la valutazione del rischio da caduta massi. *Geologia tecnica & ambientale, Journal of technical & environmental geology*, 3-31
- Carlton, H., & Norton, S. (1991). *Development of an Unstable Slope Management System*. Washington.
- Clamote, V., & Salgado, T. (2011). A evolução da serra da Malcata - *Estudo de geomorfologia*, 143–153.
- Costa, A. (2015). *Avaliação da estabilidade de taludes em rochas de resistência elevada – um contributo*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Special report: Landslide types and processes. Turner AK, Schuster, RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*, 247, 36-75.
- Darrow, M., Huang, S., & Calvin, P. (2009). Final report: Unstable slope management program: Background Research and Program Inception , Alaska, 1-67.
- Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., & Kullberg, J. C. (eds.) (2013). *Geologia de Portugal. Vol II: Geologia Meso-cenozóica de Portugal*. Lisboa: Escolar Editora.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, L. (1996). *Landslide recognition: Identification, movement, and causes*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd.
- Fell, R., Hungr, O., Leroueil, S., & Riemer, W. (2000). Keynote lecture - geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil: *Proceedings of GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 1, 21–120.

- Ferreira, A. (1991). Caracterização de Portugal Continental. LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Flageollet, J., & Webber, D. (1996). Fall. In Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester, 12–28.
- Franklin, J., & Senior, S. A. (1997). The Ontario rockfall hazard rating system, in: *Proc. Int. Conf. on Eng. Geol. and the Env.*, Balkema, Rotterdam, 647–656.
- Franklin, J., Wood, D., Senior, S., & Blair, J. (2012). Report: RHRON : Ontario Rockfall Hazard Rating System - Field Procedures Manual, Ontario, 1-71
- Geotechnical Engineering Bureau (2015). Rock Slope Rating Procedure - Department of Transportation, New York, 1-49
- Gonçalves, D. M. (2014). Reabilitação de taludes de escavação em rochas de baixa resistência na ER 266. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Gonçalves, F., & Torre de Assunção, C. F. (1966). Carta geológica de Portugal, folha 18-D Nave de Haver. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50.000.
- Gonçalves, F., & Torre de Assunção, C. F. (1966). Notícia explicativa, folha 18-D Nave de Haver. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50000.
- Goodman, R. E., & Bray, J. W. (1976). Toppling of Rock Slopes. The proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and slopes, Colorado, 201-234
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1994). *Rock Slope Engineering* 3<sup>th</sup> ed. Institution of Mining and Metallurgy. London: Spon Press
- Hungr, O., & Evans, S. . (1989). Engineering aspects of rockfall hazard in Canada. Geological Survey of Canada.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proc. 5h. Int. Symposium on Landslides* (E. Bonnard, C), 1.
- IITBHU - Indian Institute of Technology Banaras Hindu University (2017). Slope stabilization Varanasi, 1–43.
- IMT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes (2015). Comunicação escrita do Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. -Transporte ferroviário: Relatório anual de segurança. Recebido a 6/09/2017.
- IP - Infraestruturas de Portugal (2017). Comunicação escrita das Infraestruturas de Portugal - Dados de tráfego - Direção Comercial e Desenvolvimento de Negócio. Recebido a 6/09/2017.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts*.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1980). Basic Geotechnical Description of Rock Masses - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*.
- Jorge, M. A. G. (2009). Geomorfometria da bacia hidrográfica do rio Côa. Bolsa Universidade de Lisboa / Fundação Amadeu Dias.
- Liang, R., Geiger, G., Beach, K., & Penosomboom, G. (2006). Landslide Hazard Rating System in Ohio DOT. *GeoCongress Vol. 1* (330), 1–6.
- Macdonald, D. B. (2006). Report: Unstable Slopes on I-90 Snoqualmie Pass, Reassessment and Recommendations: Washington Department of Transportation, 1-43.
- Mauldon, M., Durumm, E., Dunne, W. M., Bateman, V., Rose, B., & Kim, M. (2007). Report: Rockfall Management System for Tennessee: Tennessee Department of Transportation.



- Nascimento, Ú. (1980). Exemplos Portugues de Problemas de Estabilidade de Taludes, 19-22. Curso de Estabilidade de Taludes, Universidade Nova de Lisboa.
- Nunes, A., Guedes, P., & Cardoso, A. (2002). Análise de situações de instabilidade em taludes rochosos de escavação em meio rodoviário. Aplicação ao trecho da EN 222 entre a Régua e a Ponte das Bateiras. Instituto das Estradas de Portugal.
- Oliveira, N. (2010). Soluções para a Estabilização de Taludes em Linhas Férreas. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pensomboon, G. (2007). Landslide risk management and Ohio database. Master dissertation, Faculty of The University of Akron.
- Pereira, I.M. (2014). Petrologia e geoquímica dos migmatitos e granitóides do sector Figueira de Castelo Rodrigo - rio Águeda: evolução litológica e estrutural no contexto da zona de Cisalhamento Juzbado - Penalva do Castelo. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço, Universidade de Évora.
- Pierson, L., Davis, S. A., & Van Vickie, R. (1990). Rockfall Hazard Rating System – Implementation Manual. Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. of Transp.
- Pierson, L., E, C., & Van Vickie, R. (1993). Report: Rockfall Hazard Rating System. Washington DC: Federal Highway Administration.
- Pierson, L., & Van Vickie, R. (1993). Rockfall Hazard Rating System - Participant's Manual, FHWA, U.S. Dep. of Transp., 1-104.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., & Correia, A. G. (2015). SQI – A quality assessment index for rock slopes. Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development 1639–1644.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., & Correia, A. G. (2015). A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 76, 182–191.
- Público (2007). Acidente na Linha do Tua provocado pelo desabamento de pedras. Obtido 10 de Agosto de 2017, de <https://www.publico.pt/2007>.
- Ribeiro, A., Sousa, B., & Noronha, F. (1991). A formação (vulcano-sedimentar) de Envendos -Livro de Resumos do I/1 Congresso Nacional de Geologia. Museu e Laboratorio Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (p. 72). Coimbra.
- Ricardo, P., Gardete, D., & Luzia, R. (sem data). Aplicação Do Sistema De Avaliação De Risco « Rockfall Hazard Rating System » Nos Taludes Da Via En353 Em Idanha a Nova.
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and Its Control. In Highway Research Record 17, Stability of Rock Slopes, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 13–28.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics ISRM, Zacatecas, 49-53.
- Romana, M. (1993). A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. Comprehensive Rock Engineering, 575-600.
- Romana, M., Serón, J. B., & Montalar, E. (2003). SMR Geomechanics classification : Application, experience and validation. Em Rock Mechanics Vol. 4, 3–6.
- Santi, P., Russell, C. P., & Higgins, J. (2008). Report: Modification and Statistical Analysis of the Colorado, Colorado Department of Transportation 1-124.
- Santos, G. (2014). Soluções de Pregagens para a Estabilização de Taludes: uma Contribuição para o seu Dimensionamento. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, A. P. (2016). Aula de Infraestruturas e outras Obras - Departamento de Ciências da Terra (FCT/UNL).

- Spang, R., & Rautenstrauch, R. (1988). Empirical and mathematical approaches to rockfall prediction and their practical applications. 5th Int. Symposium on Landslides, Lusanne.
- Teixeira, C., Martins, J., Medeiros, A., Pilar, L., Mesquita, L., Neves Ferro, M., Rocha, A. (1962). Carta geológica de Portugal, folha 18-C Guarda. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50.000.
- Teixeira, C., Martins, J., Medeiros, A., Pilar, L., Mesquita, L., Neves Ferro, M., Rocha, A. (1962). Notícia explicativa, folha 18-C Guarda. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50.000.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., Pilar, L., Lopes, T. J., & Rocha, A. T. (1959). Carta geológica de Portugal, folha 18-B Almeida. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50.000.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., Pilar, L., Lopes, T. J., & Rocha, A. T. (1959). Notícia explicativa, folha 18-B Almeida. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, na escala 1/50.000.
- Vallejo, L., & Ferrer, M. (2011). Geological Engineering, 2.<sup>a</sup> ed. London: Taylor & Francis Group.
- Vallejo, L., Ortuño, M., & Otteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación.
- Vandewater, C. J., Dunne, W. M., Mauldon, M., Drumm, E. C., & Bateman, V. (2005). Classifying and assessing the geologic contribution to rockfall hazard. Em Environmental and Engineering Geoscience Vol. 11, 141–154.
- Varnes, D. J. (1978). Research board special report: Slope Movement Types and Processes. Transportation , 11–33.
- WSDOT. (2010). WSDOT - Unstable Slope Management Program, (360), 1–4.
- Wyllie, D. C. (1987). Rock slope inventory: Proceedings, Federal Highway Oregon Administration Rockfall Mitigation Seminar, FHWA Region 10, Portland Oregon.
- Youssef, A., Maerz, N. H., & Fritz, M. A. (2003). A Risk-Consequence Hazard Rating System for Missouri Highway Rock Cuts. Geology Symposium, Burlington, Vermont, 175–195.

**ANEXOS**



## **ANEXO A – Parâmetros de caracterização dos sistemas de descontinuidades segundo ISRM, 1978**

**Tabela A.1 – Descrição do espaçamento segundo a ISRM**

<b>Descrição</b>	<b>Espaçamento</b>
Extremamente próximas	< 20mm
Muito próximas	20 -60mm
Próximas	60 – 200mm
Moderadamente próximas	200 – 600mm
Afastadas	600 – 2000mm
Muito afastadas	2000 – 6000mm
Extremamente afastadas	>6000mm

*adaptado de ISRM, 1978*

**Tabela A.2 - Descrição da persistência segundo a ISRM**

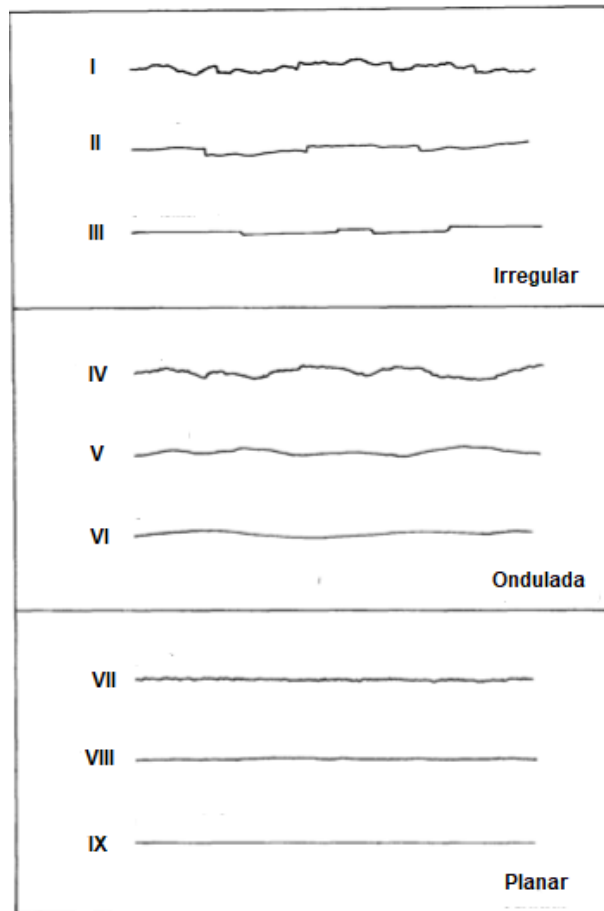
<b>Persistência</b>	<b>Extensão</b>
Muito baixa	<1m
Baixa	1 -3m
Média	3 – 10m
Alta	10 – 20m
Muito alta	>20m

*adaptado de ISRM, 1978*

**Tabela A.3 - Descrição da abertura segundo a ISRM**

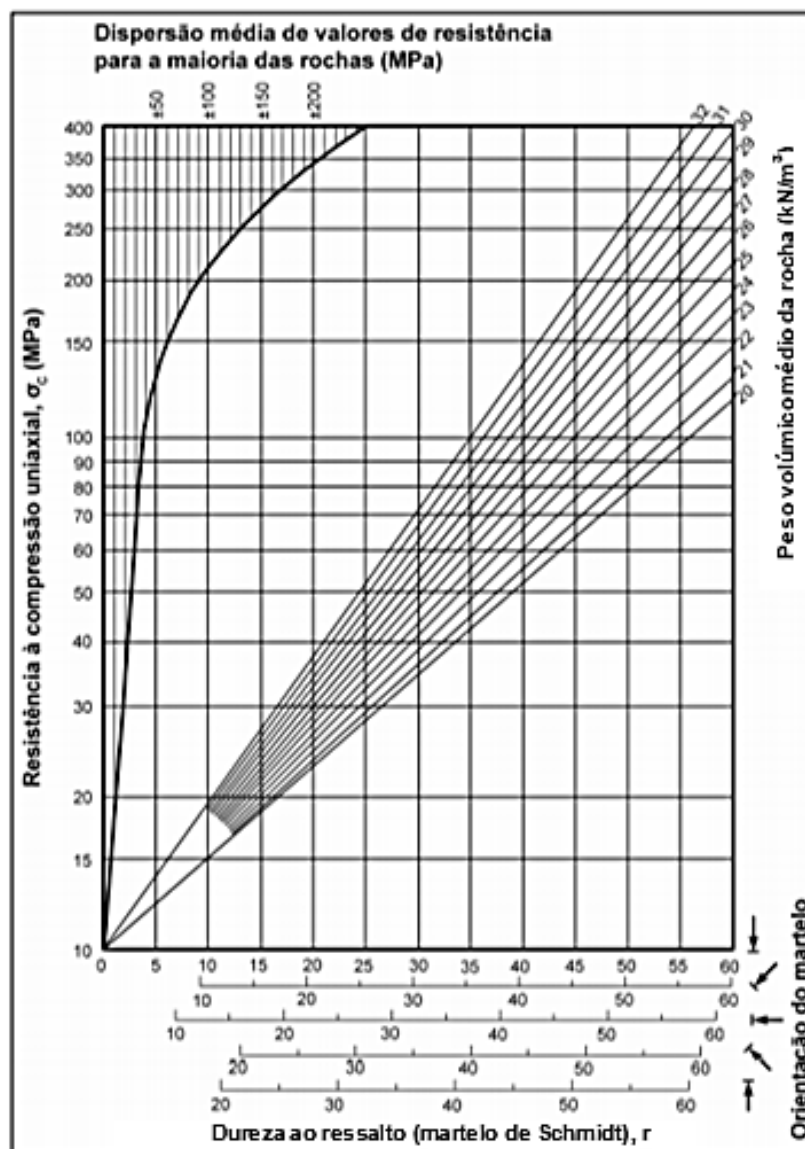
<b>Descrição</b>	<b>Abertura</b>
Muito fechadas	< 0,1mm
Fechadas	0,1 -0,25mm
Parcialmente abertas	0,25 – 0,5mm
Abertas	0,5 – 2,5mm
Moderadamente grande	2,5 – 10mm
Largas	>10mm
Muito largas	1 – 10cm
Extremamente largas	10 – 100cm
Cavernosas	>1m

*adaptado de ISRM, 1978*



*adaptado de ISRM, 1978*

**Figura A.1 – Perfis de rugosidade e sua nomenclatura**



*adaptado de Vallejo et al., 2004*

Figura A.2 - Ábaco utilizado no cálculo da resistência à compressão uniaxial a partir do martelo de Schmidt (tipo L)





## ANEXO B - Tabelas para obtenção do $RMR_{básico}$ e SMR

### Rock Mass Rating

Na eventualidade da informação das condições das descontinuidades ser mais detalhada, é aconselhada a utilização da tabela que se segue, onde o respetivo peso total será o somatório dos parâmetros nela presentes.

**Tabela B.1 – Parâmetros de obtenção do RMR**

Parâmetros			Intervalos de valores						
1	Resistência da rocha intacta	Point load (MPa)	>10	4– 10	2– 4	1– 2	Compressão uniaxial		
		RCU (MPa)	>250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5– 25	1– 5	<1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90– 100	75– 90	50– 75	25– 50	<25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6 – 2m	200– 600mm	60– 200mm	<60mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (consultar Tabela B.2)		Superfícies muito rugosas, Sem continuidade, Sem separação, Paredes não meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, Separação <1mm, paredes ligeiramente meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, Separação <1mm, Paredes muito meteorizadas	Superfícies estriadas/ com enchimento <5mm de espessura ou separações com 1 – 5mm contínuas	Enchimento mole com >5 mm ou separações >5mm contínuas		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Percolação de água	Caudal por 10 m de túnel (L/min)	Nenhum	<10	10– 25	25– 125	>125		

Parâmetros			Intervalos de valores				
		Pressão de água nas diaclases / tensão principal máxima	0	<0,1	0,1– 0,2	0,2– 0,5	>0,5
		Condições gerais	Totalmente seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluindo
	Peso		15	10	7	4	0

*adaptado de Bieniawski, 1989 in Costa, 2015*

**Tabela B.2 - Classificação a adotar para as condições das descontinuidades para cálculo do RMR**

Parâmetro	Intervalo de valores				
<b>Comprimento da descontinuidade (persistência)</b>	<1m	1 – 3m	3 – 10m	10 – 20m	>20m
<b>Peso</b>	6	4	2	1	0
<b>Separação (abertura)</b>	Nenhuma	<0.1mm	0,1 – 1mm	1 – 5mm	>5mm
<b>Peso</b>	6	5	4	1	0
<b>Rugosidade</b>	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Macia	Lisa
<b>Peso</b>	6	5	3	1	0
<b>Enchimento</b>	Nenhum	Enchimento duro		Enchimento mole	
		<5mm	>5mm	<5mm	>5mm
<b>Peso</b>	6	4	2	2	0
<b>Meteorização</b>	Sem meteorização	Ligeiramente meteorizada	Medianamente meteorizada	Muito meteorizada	Decomposta
<b>Peso</b>	6	5	3	1	0

*adaptado de Bieniawski, 1989 in Costa, 2015*

O parâmetro orientação das descontinuidades é analisado separadamente, visto que a sua influência depende do tipo de obra de engenharia a realizar (Bieniawski, 1989).

**Tabela B.3 - Ajuste dos pesos relativamente à orientação das descontinuidades para o cálculo do RMR**

Direção e inclinação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
<b>Pesos</b>	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

*adaptado de Bieniawski, 1989 in Costa, 2015*

Obtidos todos os parâmetros que integram a classificação e, efetuado o somatório dos seus pesos, procede-se à atribuição da classe correspondente a partir do valor calculado.

**Tabela B.4 - Classes do maciço rochoso segundo o valor de RMR**

Valor RMR	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 20	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha razoável	Rocha fraca	Rocha muito fraca

*adaptado de Bieniawski, 1989 in Costa, 2015*

## Slope Mass Rating

Tabela B.5 - Obtenção do factor de ajuste F1

Causa de rotura	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar $ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30° – 20°	20° – 10°	10° – 5°	< 5°
Tombamento $  \alpha_j - \alpha_s  - 180^\circ $					
Valor de F <sub>1</sub>	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Relação	$F_1 = (1 - \sin  \alpha_j - \alpha_s )^2$				

$\alpha_j$  – Direção da descontinuidade;  $\alpha_s$  – Direção da face do talude

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

**Tabela B.6 - Obtenção do factor de ajuste F2**

Causa de rotura		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
$ \beta_j $		< 20°	20° – 30°	30° – 35°	35° – 45°	> 45°
Valor de $F_2$	Planar	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
	Tombamento	1,00				
Relação		$F_2 = \tan^2 \beta_j$				

$\beta_j$  – Inclinação da descontinuidade

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

**Tabela B.7 - Obtenção do factor de ajuste F3**

Causa de rotura	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar $\beta_j - \beta_s$	> 10°	10° – 0°	0°	0° – (-10°)	<(-10°)
Tombamento $\beta_j + \beta_s$	<110°	110° – 120°	>120°	–	–
Valor de $F_3$	0	-6	-25	-50	-60

$\beta_j$  – Inclinação da descontinuidade;  $\beta_s$  – Inclinação da face do talude

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

**Tabela B.9 – Obtenção do fator de ajuste F4 relativo ao método de escavação**

Método	Talude natural	Pré-corte	Explosões leves	Explosões normais ou escavação por meios mecânicos	Explosões deficientes
Valor de $F_4$	15	10	8	0	-8

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

**Tabela B.10 - Descrição das diferentes classes de SMR**

Classe	Valor de SMR	Descrição	Estabilidade	Rotura	Suporte
I	81 – 100	Muito bom	Completamente estável	Nenhuma	Nenhum
II	61 – 80	Bom	Estável	Alguns blocos	Ocasionalmente
III	41 – 60	Normal	Parcialmente estável	Pequenas planares ou muitas por cunhas	Sistemático
IV	21 – 40	Mau	Instável	Planar ou grandes por cunhas	Importante / corretivo
V	0 – 20	Muito mau	Completamente instável	Grandes planar ou circular	Reescavação

*adaptado de Romana et al., 2003 in Costa, 2015*

**Tabela B.11 - Medidas minimizadoras por classes**

Classe	SMR	Medida
Ia	91 – 100	Nenhuma
Ib	81 – 90	Nenhuma; Reperfilamento
IIa	71 – 80	Nenhuma; Valas de pé de talude ou vedações
		Pregagens esporádicas
IIb	61 – 70	Valas de pé de talude; Redes
		Pregagens esporádicas ou sistemáticas
IIIa	51 – 60	Valas de pé de talude e/ou redes
		Pregagens esporádicas ou sistemáticas
		Betão projetado esporádico
IIIb	41 – 50	Valas de pé de talude e/ou redes
		Pregagens sistemáticas; Ancoragens
		Betão projetado sistemático
		Muros no pé do talude e/ou betão de limpeza
IVa	31 – 40	Ancoragens
		Betão projetado sistemático
		Muros no pé do talude e/ou vigas de betão
		(Reperfilamento) Drenagem
IVb	21 – 30	Betão projetado com fibras
		Muros no pé do talude e/ou vigas de betão

Classe	SMR	Medida
		Reperfilamento. Drenagem interna
Va	11 – 20	Muros de gravidade ou ancorados
		Reperfilamento

*adaptado de Romana, 1993 in Costa, 2015*





**ANEXO C- Descrição dos critérios do Rockfall Hazard Rating System – RHRS  
(Oregon) (in Ricardo et al., n.d.)**

**Tabela C.1 - Critérios de seleção para aplicação da classificação RHRS**

<b>Critérios/Pesos</b>	<b>3 pontos</b>	<b>9 pontos</b>	<b>27 pontos</b>	<b>81 pontos</b>
<b>Altura do talude</b>	7.5 m	15 m	22.5 m	30 m
<b>Eficácia da vala</b>	Boa capacidade	Capacidade moderada	Capacidade limitada	Sem capacidade
<b>Risco médio para veículos</b>	25%	50%	75%	100%
<b>Distância de visibilidade de decisão</b>	Adequada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muito limitada (40%)
<b>Largura da via incluindo bermas pavimentadas</b>	13,2m	11,0m	8,4m	6,0m
<b>Caso I - Condição estrutural</b>	Juntas descontínuas, com orientação favorável	Juntas descontínuas, sem orientação preferencial	Juntas descontínuas, com orientação desfavorável	Juntas contínuas, com orientação desfavorável
<b>Rugosidade entre planos</b>	Rugoso, Irregular	Ondulado	Planar	Preenchidas com argila ou abertas
<b>Caso II - Condição estrutural</b>	Pouca presença de alterações erosivas	Presença ocasional de alteração	Presença sistemática e alterações	Elevadas alterações erosivas
<b>Taxa de erosão</b>	Baixa	Moderada	Elevada	Extrema
<b>Tamanho dos blocos</b>	0.3 m	0,6 m	0,9 m	1,2 m
<b>Volume de blocos por evento</b>	2,3m <sup>3</sup>	4,6m <sup>3</sup>	6,9m <sup>3</sup>	9,2m <sup>3</sup>
<b>Clima</b>	Precipitação baixa a moderada; sem períodos de gelo	Precipitação moderada; ligeiros períodos de gelo	Precipitação elevada ou períodos de gelo	Precipitação elevada e períodos de gelo contínuos longos períodos de gelo
<b>Histórico de queda de blocos</b>	Poucas	Ocasionais	Muitas	Constantes

*adaptado de Pierson & Van Vickie, 1993*

- Altura do talude:

$$x = \frac{\text{altura do talude}}{7,5}$$

- *Eficácia da vala*: consiste na atribuição de uma pontuação função da existência ou não de vala e, da sua eficácia no que respeita ao impedimento de entrada de blocos na via.
- Risco médio para veículos – RMV:

$$RMV (\%) = \frac{TMH \times \text{Comprimento do troço em risco (km)}}{\text{Velocidade limite da zona (km / h)}} \times 100$$

Onde:

*TMH* – Tráfego médio horário:

Para obter o valor do critério correspondente recorre-se à seguinte equação:

$$x = \frac{RMV}{25}$$

- Distância de visibilidade de decisão - DVD:

$$DVD(\%) = \frac{DVD_{real}}{DVD_{proj}} \times 100$$

$DVD_{real}$  – Distância de visibilidade de decisão real, depende do traçado da via

$DVD_{proj}$  – Distância de visibilidade de decisão de projeto, depende da velocidade de projeto

Para obter o valor do critério correspondente, recorre-se à seguinte equação:

$$x = \frac{120 - DVD}{20}$$

- Largura da via incluindo bermas pavimentadas:

$$x = \frac{15,86 - \text{largura da via (m)}}{2,44}$$

- Dimensão dos blocos ou volume dos blocos resultantes da rotura:

$$x = \text{Dimensão do bloco (m)}$$

ou

$$x = \frac{\text{Volume do bloco (m}^3\text{)}}{2,4}$$

- **Características geológicas:** Critério caracterizado de forma distinta dos anteriores, atendendo a que apresenta dois casos, sendo necessário optar por um deles, podendo ter interpretações distintas para diferentes utilizadores.
  - i. **Caso I:** compreende sistemas de taludes em que as descontinuidades são o sistema estrutural principal que afeta a possibilidade de rotura.
  - ii. **Caso II:** compreende um sistema estrutural alterado devido à erosão.
- **Clima e presença de água:** Associado à precipitação, dado que tem grande influência na estabilidade dos taludes. Assim sendo, procede-se à análise da quantidade de precipitação anual, à presença de água nas faces dos taludes e à possibilidade de existência de ciclos gelo-degelo, durante alguns períodos do ano. Neste critério também é relevante analisar, caso exista, o historial de queda de blocos em dias de precipitação ou períodos de chuva intensa. Consideram-se:
  - Zonas de baixa precipitação aquelas com valores da ordem dos 550 mm/ano;
  - Zonas de elevada precipitação aquelas cujos valores se encontrem na ordem dos 1375 mm/ano.
- **Historial de queda de blocos:** Analisam-se registos de queda de blocos ao longo dos anos. A frequência, a quantidade, em que condições climáticas ocorreram e os danos provocados são os dados a recolher, não só para aplicação do método em si, mas também com vista ao tratamento estatístico das consequências dessas mesmas quedas.



## ANEXO D – RHRS – Adaptações

### NYSDOT, Nova Iorque

Tabela D.1 - Sistema de classificação adotado pelo NYSDOT

Category	1 Point	3 Points	9 Points	27 Points	81 Points
<b>Slope Height</b>	4.6m	4.6 to 7.6m	7.6 to 10.7m	10.7 to 13.7m	13.7m or more
<b>Slope Length</b>	15m	15 to 30m	30 to 46m	46 to 61m	61m or more
<b>Visibility</b>	Adequate stopping distance	Good visibility	Moderate visibility	Limited Visibility	Very limited visibility
<b>Traffic</b>	Very light	Light	Moderate	Heavy	Very heavy continuous
<b>Ditch dimension/ set back</b>	Meets Ritchie Criteria	Adequate width, inadequate depth	Moderate catchment	Limited catchment	Nil
<b>Geology</b>	Massive, no fractures dipping out of slope	Discontinuous fractures, random orientation	Fracture from wedges	Discontinuous fractures dipping out of slope	Continuous fractures out of slope
<b>Geology (sedimentary)</b>	Horizontally slightly dipping	Raveling occasionally small blocks	Small overhangs or columns numerous small blocks	Overhang some large unstable blocks, high columns	Bedding or joint dipping out of slope, over steepened cut face
<b>Block size</b>	150mm	150 to 300 mm	0.3 to 0.6m	0.6 to 1.5m	1.5m or more
<b>Rock friction</b>	Rough, irregular	Undulating	Planar	Smooth , slickenside	Clay, gouge faulted
<b>Water ice</b>	Dry	Some seepage	Moderate seepage	High seepage/Brush	High seepage with long back slope/ brush
<b>Rockfall</b>	No falls	Occasional minor spells	Occasional falls	Regular falls	Major falls/ slides
<b>Backslope above cut</b>	Flat to gentle slope (15°)	Moderate slope (15°- 25°)	Steep slope (25°-35°)	Very steep slope (35°)or steep with boulder	Very steep slope with boulders

*in Pensomboon, 2007*

**Tabela D.2 - Classificação do risco para as diferentes pontuações totais**

<b>Ranking</b>	<b>Point total</b>	<b>Risk of rock fall</b>
5	Greater than 500	High risk
4	400 to 500	Moderate risk
3	250 to 400	Low risk
2	50 to 250	Very low risk
1	less than 150	Minimal risk

*in Pensomboon, 2007*

## USMS, Washington

Para vias com menor tráfego e, conseqüentemente de menor importância, recorrem-se aos critérios identificados e devidamente pontuadas na Tabela D.2 (WSDOT, 2010).

**Tabela D.3 – Critérios de classificação aplicados no USMS para vias de menor tráfego**

<b>Critérios</b>	<b>3 Pontos</b>	<b>9 Pontos</b>	<b>27 Pontos</b>	<b>81 Pontos</b>
<b>Altura do talude</b>	<7.5m	7.5 a 15m	15 a 22.5m	>22.5m
<b>Eficácia da valeta</b>	Boa captação	Captação moderada	Captação limitada	Sem captação
<b>Largura total da rodovia</b>	>12m	9.6m	7.2m	<7.2m
<b>Histórico de queda de blocos</b>	Algumas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Quedas constantes
<b>Número de manutenções por ano</b>	<1	1 a 3	4 a 5	>5
<b>Tamanho dos blocos</b>	<0.3m	0.3 a 0.6m	0.6 a .9m	>0.9m
<b>Volume de blocos por ano</b>	<2,3m <sup>3</sup>	2,3 a 4,6 m <sup>3</sup>	4.6 a 7.7m <sup>3</sup>	>7.7m <sup>3</sup>
<b>Tráfego médio diário</b>	<500	500 a 2750	2751 a 5000	>5000

*adaptado de WSDOT, 2010*

## CDOT, Colorado

Tabela D.4 - Sistema de classificação adotado pelo CDOT

Category	Rating criteria and scores			
	3 points	9 points	27 points	81 points
<b>(1) Slope</b>				
Slope height (m)	7.5–15	15–23	23–30	[30
Rockfall frequency	2 years	1–2 years	Yearly, seasonal	Year-round/several events
Average slope angle score	0–2	2–4	4–8	> 8
Launching features	None (smooth slope)	Minor (< 0.6 surface variation)	Many (0.6–1.8 surface variation)	Major (>0.8 surface variation)
Ditch catchment (%)	Class 1 (95–100)	Class 2 (65–94)	Class 3 (64–30)	Class 4 (< 30)
<b>(2) Climate</b>				
Precipitation (mm/year)	< 250	250–500	500–900	>900
Annual freeze–thaw cycles	1–5	6–10	11–15	> 16
Seepage/water	Dry	Damp/wet	Dripping	Running water
Slope aspect	N	E, W, NE, NW	SE, SW	S
<b>(3) Geology</b>				
<b>(a) Sedimentary rocks</b>				
Degree of undercutting (m)	< 0.3	0.3–0.6	0.6–1.2	>1.2
Jar slake	< 6	5	3–4	> 2
Degree of interbedding	1–2 weak interbeds < 15 cm	1–2 weak interbeds, > 15 cm	> 2 interbeds,< 15 cm	> 2 interbeds, > 15 cm
<b>(b) Crystalline rocks</b>				
Rock character	Homogenous/massive	Small faults/strong veins	Schist shear zone<15 cm	Weak pegmatite/micas/shear zones > 15 cm
Degree of overhang (m)	< 0.3	0.3–0.6	0.6–1.2	1.2
Weathering grade	Fresh	Surface staining	Slightly altered/softened	Core stones
<b>(c) Discontinuities</b>				
Block size (m) or volume (m³)	0.3 0.75	0.3–0.6 0.75–2.3	0.6–1.5 2.3–7.6	1.5 7.6
Number of sets	1	1 plus random	2	2



Category	Rating criteria and scores			
	3 points	9 points	27 points	81 points
<b>Persistence (m) and orientation</b>	< 3 and dips into slope	> 3 and dips to slope	< 3 and daylightings out of slope	> 3 and daylightings out of slope
<b>Aperture (mm)</b>	Closed	0.1–1	1–5	5
<b>Weathering conditions</b>	Fresh	Surface staining	Granular infilling	Clay infilling
<b>Friction</b>	Rough	Undulating	Planar	Slickenside
<b>(d) Block in matrix</b>				
<b>Block size (93)</b>	< 0.3m	0.3–0.6m	0.6–1.5m	> 1.5m
<b>Block shape (93)</b>	Tabular	Blocky	Blocky to angular	Rounded and smooth
<b>Vegetation (93)</b>	Fully vegetated	Patchy vegetated	Isolated plants	None

*Santi et al., 2008*

**Tabela D.5 - Critérios de avaliação do tráfego utilizados no CDOT**

Category	Rating criteria and scores			
	3 points	9 points	27 points	81 points
<b>Percent of decision sight distance (%)</b>	<80	60–80	40–60	>40
<b>Average vehicle risk (%)</b>	<24	25–59	60–74	>75
<b>Number of accidents (n)</b>	0–2	3–5	6–8	>9

*Santi et al., 2008*

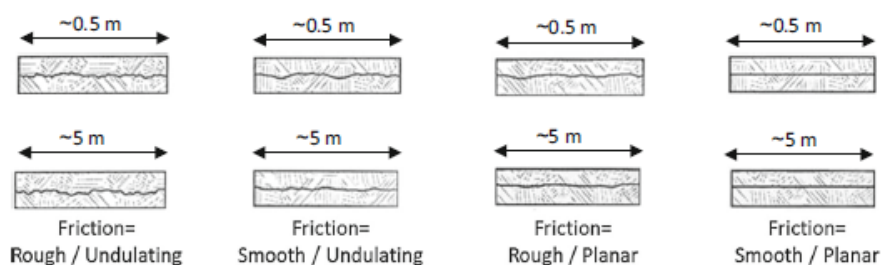
## TDOT, Tennessee

**Tabela D.6 - Sistema de classificação adotado pelo TDOT**

Category	Rating criteria and scores			
<b>(1) Planar rockfall mode</b>				
<b>Abundance (%)</b>	< 10	10–20	20–30	> 30
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Block size (m)</b>	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Steepness (°)</b>	0–20	20–40	40–60	> 60
<b>Score</b>	2	5	14	41
<b>Friction</b>	Rough/undulating	Smooth/undulating	Rough/planar	Smooth/planar
<b>Score</b>	2	5	14	41
<b>(2) Wedge rockfall mode</b>				
<b>Abundance (%)</b>	< 10	10–20	20–30	> 30
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Block size (m)</b>	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Steepness (°)</b>	0–20	20–40	40–60	> 60
<b>Score</b>	2	5	14	41
<b>Friction</b>	Rough/undulating	Smooth/undulating	Rough/planar	Smooth/planar
<b>Score</b>	2	5	14	41
<b>(3) Topple rockfall mode</b>				
<b>Abundance (%)</b>	< 10	10–20	20–30	> 30
<b>Score</b>	5	14	41	122
<b>Block size (m)</b>	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8
<b>Score</b>	5	14	41	122
<b>(4) Differential weathering rockfall mode</b>				
<b>Abundance (%)</b>	< 10	10–20	20–30	>30
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Block size (m)</b>	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8
<b>Score</b>	3	9	27	81
<b>Relief (m)</b>	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8

Category	Rating criteria and scores			
Score	3	9	27	81
(5) Raveling rockfall mode Abundance (%)	< 10	10–20	20–30	> 30
Score	3	9	27	81
Block size (m)	< 0.3	0.3–0.9	0.9–1.8	> 1.8
Score	3	9	27	81
Shape	Tabular	Blocky	Round	
Score	3	9	27	

*Vandewater et al., 2005*



*Barton, 1973 in Vandewater et al., 2005*

**Figura D.1 - Guia de reconhecimento do desgaste da rocha em campo, os perfis indicam situações de micro e macro desgaste**

**Tabela D.7 - Critérios de classificação do historial de movimentos de massa**

Rockfall benchmark	Frequency of occurrence (per year)	Field judgement	Score
<b>Few</b>	At most 1	No impact marks on the roads, few rocks in the ditch	3
<b>Several</b>	2	No impact marks and rocks on the road, many rocks in the ditch	9
<b>Many</b>	3–4	Few impact marks or few rocks on the road	27
<b>Constant</b>	At least 5	Many impact marks and/or many rocks on the road	81

*Mauldon et al., 2007*

## ODOT Oregon II

Tabela D.8 - Sistema de classificação adotado pelo Oregon State DOT, 2001

1. Failure Type/ Hazard	Vary small or insignificant failure that do not affect the roadway (not score)	Low Hazard; slower slide with potential for causing a road hazard (9 points)	Medium Hazard; slide that have not moved suddenly in the past, but have the potential to cause a road hazard (27 points)	High Hazard; rapid slide that have created a road hazard in the past. Includes debris flow and rockfalls (81100 Points based on sight distance)
----------------------------	--	--	--	---

		Low hazard receive 0 point	Medium hazard receive maximum of 54 points				High hazard can receive full point range		
Roadway impact (pick one)	Landslides:	All low hazard slide above (0 point)	Would only affect shoulder during major failure (3 points)	Two-way traffic would remain after major failure (9 points)	One way traffic would remain after major failure (27 points)	Total closer in the vent of major failure 03 miles detour (54 points)	Total closure in the event of major failure; 310 mile detour (70 points)	Total closure in the event of major failure; 10 -60 mile detour (85 point)	Total closure in the event of major failure > 60 mile detour (100 points)
	or								
	Rockfalls:		Rockfall are completely contained in ditch (3 points)	Rocks fall into shoulder only (9 points)	Rock are enter roadway (27 points)	No ditch, all falling rocks enter roadway (81 points)	Rock occasionally fill part or all of a lane (100 points)		

3. Annual Maintenance Frequency	0-5 Failure Per Year Sliding scale from 1-100 points
---------------------------------	---

4. Average Daily Traffic	0-40,000 Cars per day Sliding scale from 1-100 Points
--------------------------	--

5. Accident history	No accident (3 points)	Vehicle or Property Damage (9 points)	Injury (27 Points)	Fatality (100 Points)
---------------------	------------------------	---------------------------------------	--------------------	-----------------------

in Pensomboon, 2007

**Tabela D.9 - Fatores de classificação de rodovias**

Highway type	Highway Factor
District Highway	1.0
Regional Highway	1.05
Statewide highway	1.1
Interstate highway	1.2

*in Pensomboon, 2007*

**Tabela D.10 - Fatores de manutenção Custo-Benefício**

<u>20-Yr Maintenance Cost</u> Repair Cost	Maintenance Benefit-Cost Factor
>0.0-0.2	0.5
≥0.2-0.4	0.75
≥0.4-0.6	1
≥0.6-0.8	1.06
≥0.8-1.0	1.12
≥1.0-1.2	1.18
≥1.2-1.4	1.24
≥1.4-1.6	1.3
≥1.6-1.8	1.36
≥1.8-2.0	1.42
≥2.0	1.5

*in Pensomboon, 2007*

## MORH RS – Missouri

Tabela D.11 - Fatores aplicados para o cálculo do risco

<b>Slope height (ft)</b>	10			20			30	40		50	60
Rating	2			4			6	8		10	12
<b>Slope angle</b>	30°		40°	50°			60°	70°		80°	90°
Rating	0		2	4			6	8		10	12

<b>Rockfall Instability</b>	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
Class Number	4	3	2	1	0
Rating	12	9	6	3	0
<b>Weathering</b>	High	Moderate	Low	Slight	Fresh
Class Number	4	3	2	1	0
Rating	12	9	6	3	0
<b>Intact rock strength</b>	Very strong	Strong	Moderate	Weak	Very weak
Class Number	4	3	2	1	0
Rating	0	3	6	9	12
<b>Face Irregularity</b>	Very high	High	Moderate	Slight	Smooth
Class Number	4	3	2	1	0
Rating	12	9	6	3	0
<b>Face Looseness</b>	Very high	High	Moderate	Low	No
Class Number	4	3	2	1	0
Rating	12	9	6	3	0

<b>Block Size</b>	Massive (> 5 ft)	Moderately blocky (2.5 ft)	Very blocky (1 ft)	Completely crushed (< 0.5 ft)
Rating	0	3	9	12

<b>Water on the Face</b>	Dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
Class Number	0	1	2	3	4
Rating	0	3	6	9	12

**Tabela D.12 - Fatores aplicados para o cálculo das consequências**

Ditch width (ft)	0		5		10		15		
Rating	12		8		4		0		
Ditch volume (cu ft/ ft)	0	5	10	15	20	25	30		
Rating	12	10	8	6	4	2	0		
Expected Rockfall Quantity (cu ft/ ft)	< 5		10	20	30	> 40			
Rating	0		3	6	9	12			
Slope Angle	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°	90°
Rating	0	12	10	6	3	2	4	12	0
Shoulder Width (ft)	0	3	6	9	12				
Rating	12	9	6	3	0				

<b>Number of Lanes</b>	One lane	Two lanes	Three lanes	Four lanes
Rating	12	6	3	0
<b>Average Daily Traffic</b>	5000 Cars / day	10000 Cars / day	15000 Cars / day	20000 Cars / day
Rating	3	6	9	12
<b>Average Vehicle Risk</b>	Low Risk 25% of the time	Medium Risk 50% of the time	High Risk 75% of the time	Very high Risk 100% of the time
Rating	3	6	9	12
<b>Design Sight Distance</b>	Very Limited	Limited	Moderately Limited	Adequate
Class Number	3	2	1	0
Rating	12	8	4	0
<b>Block Size</b>	Massive (> 5ft)	Moderately blocky (2.5ft)	Very blocky (1ft)	Completely crushed (< 0.5ft)
Rating	12	8	4	0

*Youssef et al., 2003*

**Tabela D.13 - Fatores de ajuste para o risco**

<b>Adversely Oriented Discontinuities</b>	<b>Favorable</b>	<b>Fair</b>	<b>Unfavorable</b>	<b>Very Unfavorable</b>
<b>Dip angle of discontinuities, Daylighting into cut</b>	< 20	20 – 45	45 - 65	65 – 90
Rating	0	4	8	12

*Youssef et al., 2003*

**B- Sinkhole effect**

<b>Filled sinkhole size</b>	<b>Small 50 ft wide</b>	<b>Medium 100 ft wide</b>	<b>Large 150 ft wide</b>
Rating Value	4	8	12

**Tabela D.14 - Fatores de ajuste para as consequências**

<b>Ditch Capacity Exceedence (RFQ/DV)</b>	1	2	3	4
Rating Value	0	5	10	15

*Youssef et al., 2003*

**Ditch Capacity Exceedance (Expected Rockfall Quantity/Ditch volume) (ERQ/VV)**

- Se  $ERQ/VV = 1$  então a vala irá captar todos os blocos soltos que possam vir a cair;
- Se  $ERQ/VV = 2$  então a vala irá captar a maioria dos blocos;
- Se  $ERQ/VV = 3$  então os blocos poderão atingir a berma da via;
- Se  $ERQ/VV = 4$  então os blocos irão atingir a via.



## modified RHRS

Tabela D.15 - Sistema de classificação modificada por Budetta (2004)

	Pontuação			
<b>Critérios</b>	<b>3 pontos</b>	<b>9 pontos</b>	<b>27 pontos</b>	<b>81 pontos</b>
<b>Altura do talude</b>	7,5m	15m	22,5m	> 30m
<b>Eficácia da vala</b>	Boa retenção: dimensionada corretamente de acordo com o ábaco de Ritchie + barreiras de proteção	Moderada retenção: dimensionada corretamente de acordo com o ábaco de	Retenção limitada: dimensionada incorretamente	Sem retenção
<b>Risco médio para veículos</b>	25%	50%	75%	100%
<b>Distância de visibilidade de decisão</b>	Adequada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muito limitada (40%)
<b>Largura da via</b>	21,5m	15,5m	9,5m	3,5m
<b>SMR</b>	80	40	27	20
<b>Tamanho dos blocos</b>	30cm	60cm	90cm	120cm
<b>Volume dos blocos</b>	26dm <sup>3</sup>	0,21m <sup>3</sup>	0,73m <sup>3</sup>	1,74m <sup>3</sup>
<b>Volume de blocos por evento</b>	2,3m <sup>3</sup>	4,6m <sup>3</sup>	6,9m <sup>3</sup>	9,2m <sup>3</sup>
<b>Clima e presença de água no talude</b>	h = 300mm ou sem períodos de gelo	h = 600mm ou ligeiros períodos de gelo	h = 900mm ou períodos de gelo contínuo	h = 1200mm ou períodos de gelo contínuos
<b>Historial de ocorrências</b>	1 por cada 10 anos	3 por ano	6 por ano	9 por ano

*Budetta, 2004 in Costa, 2015*

**Tabela D.16 - Níveis de risco e atuação para os valores do mRHS**

<b>Valores de mRHS</b>	<b>Nível de risco</b>	<b>Atuação</b>
<b>30 – 90</b>	Baixo	Médio
<b>90 – 180</b>	Moderado	Curto prazo
<b>180 – 270</b>	Elevado	Imediata

*Nunes et al., 2002 in Costa, 2015*

# OHDOT, Ohio

**Tabela D.17 -Sistema de classificação adotado pelo OHDOT**

CATEGORY		RATING CRITERIA and SCORE			
		Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
<b>Movement location/ impact (select higher score)</b>	Current and potential impact of landslide on roadway  Current and potential impact of landslide on area beyond right of way	On slope with a low potential to affect shoulder  On slope with a low potential to impact area beyond right of way  <b>(A)</b>	On slope with a low potential to affect roadway  On slope with moderate potential to impact area beyond right of way  <b>(B)</b>	On shoulder, or on slope with a moderate potential to affect roadway  On slope with high potential to impact area beyond right of way  <b>(C)</b>	On roadway, or On slope with a high potential to affect roadway or structure  On slope with high potential to impact structure beyond right of way  <b>(D)</b>
<b>Hazard to traveling public</b>	Rate of displacement in roadway if known	<1-inch/year	1 to 3-inches/year No single event 1-inch	3 to 6-inches/year No single event 3-inches	>6-inches/year Single event 3-inches
<b>(Select higher score)</b>	Evidence of displacement in roadway	Visible crack or dip no vertical drop <b>(E)</b>	1-inch of displacement <b>(F)</b>	1 to 3-inches of displacement <b>(G)</b>	3-inches of displacement <b>(H)</b>
<b>Maintenance</b>	Maintenance frequency	None to rare	Annually (one time/year)	Seasonal (1 to 3 times/ year)	Continuous throughout year (> 3 times/year)
<b>(Select higher score)</b>	Maintenance response	No response  <b>(I)</b>	Requires observation with periodic maintenance  <b>(J)</b>	Requires routine maintenance response to preserve roadway  <b>(K)</b>	Requires immediate response for safe travel or to protect adjacent structure  <b>(L)</b>
<b>ADT</b>		<2000 <b>(M)</b>	2001-5000 <b>(N)</b>	5001-15000 <b>(O)</b>	>15001 <b>(P)</b>
<b>%Decision Sight Distance (DSD)</b>		90 <b>(Q)</b>	89 -50 <b>(R)</b>	49-35 <b>(S)</b>	< 34 <b>(T)</b>
<b>Accident history</b>		No accident <b>(U)</b>	Vehicle or property damage <b>(V)</b>	Injury <b>(W)</b>	Fatality <b>(X)</b>

Liang et al., 2006

## USMP, Alaska

**Tabela D.18 - Classificação preliminar do talude**

Category Rating		3	9	27	81
Ditch Effectiveness		100% containment; no material on roadway	Mostly contained; minor amount on paved shoulder	Debris on paved shoulder and nearest lane	Debris blocking one or more lanes
Impact on Traffic		Normal traffic continues	Two-way traffic continues with some delay	One lane remains open	All lanes are blocked; detour required
Accident History/Potential		No accident; or low accident potential	Property damage without injury; or moderate accident potential	Injury; or high accident potential	Fatality; or extremely high accident potential
For existing Movement Historical Activity (Choose one)	Material falls on roadway...	Less than once a year	1 to 2 times a year	3 to 6 times a year	More than 6 times a year
	Maintenance required...	Once every 5 years	Every 2 to 4 years	1 to 2 times a year	More than 3 times a year
	Quantity (for soil) or Dimension (for rock) removed per event...	Less than 3yd <sup>3</sup> or < 1ft	3 – 6yd <sup>3</sup> or 1 - 2ft	6 – 12yd <sup>3</sup> or 2 - 5ft	More than 12yd <sup>3</sup> or > 5ft

*Darrow et al., 2009*

**Tabela D.19 - Critérios para a avaliação do perigo**

	Category Rating			3	9	27	81
√ one	Soil or Intermediate Geomaterial (IGM) slopes	√ one	Unfrozen	Slope contains minor (<20%) of fine-grained soils; mainly consists of well-graded sand and gravel	Mostly (>80%) fine-grained soil (silt)	Completely finegrained soil (silt and/or clay)	Mixed slope, containing boulders and/or >20% cobbles
				Frozen	Coarse-grained (sand and gravel), low ice content, temp colder than 28°F	Coarse-grained (sand and gravel), high ice content, temp warmer than 28°F	Fine-grained (silt, clay, organics), low ice content, temp colder than 28°F

			Category Rating		3	9	27	81
			Slope Angle		Less than 30°	30° - 40°	Use Rating = 81 if slope angle is greater than 40°	
			Maximum Slope Height		≤ 15ft	15 - 25ft	25 - 40ft	≥ 40ft
	Embankment		Maintenance Frequency		Once every 5 years	Every 2 to 4 years	1 or 2 times a year	More than 3 times a year
			Vertical or Horizontal Roadway Displacement		Visible crack or dip	Less than 1 inch	1 to 3 inches	Greater than 3 inches
√ one	Rock	Discontinuity Characteristics	Discontinuity Orientation (daylight angle)		Discontinuous joints, favorable orientation (non-daylighting)	Discontinuous joints, fair orientation (< 35°)	Discontinuous joints, unfavorable orientation (> 35°)	Continuous joints, unfavorable orientation (> 35°)
			Discontinuity Weathering		<i>Slight:</i> <20% discoloration, rock retains original texture, grain contact tight	<i>Moderate:</i> >20% discoloration, joint contains infilling, grain contact partially open	<i>High:</i> Complete discoloration, partially pitted, grain contact partially separate	<i>Decomposed:</i> Surface shows soil-like characteristics, grain contact completely separate
			Discontinuity Roughness		<i>Rough:</i> Large angular to vertical asperities on surface	<i>Undulating:</i> Asperities are visible and can be felt with the hand	<i>Planar:</i> Smooth to the touch	<i>Clay infilling or slickensided</i>
		Slope Angle		1:1 Slope (< 45°)	1:1 to ½:1 slope (45° - 63°)	½:1 to ¼:1 slope (63° - 76°)	¼:1 to Vertical Slope (>76°)	
		Maximum Slope Height		≤ 30 ft	30 -50 ft	50 - 65 ft	> 65 ft	
		Water Seepage/Surface Drainage			Dry, no flow	Damp, no free water present	Dripping water	Continuous water flow
Annual Freeze-Thaw Days			Less than 50 days	50 to 70 days	70 to 125 days	Greater than 125 days		
Slope Movement	Block Size Volume per Event		<u>Less than 1 ft</u> Less than 3 yd³	1-2ft 3-6yd³	2-5ft 6-12yd³	<u>Greater than 5ft</u> Greater than 12yd³		
	√ one	Historical Activity	Once every 2 to 4 years	1 to 2 times a year	3 to 6 times a year	7 times a year or more		
		Potential	Slope movement unlikely to happen	Slope movement unlikely to reach pavement	Slope movement possible, but with low frequency	Slope movement possible, and with high frequency		

**Tabela D.20 - Critérios para avaliação do risco**

Category rating	3	9	27	81
<b>Hazard class (use the score from Hazard Rating form)</b>	Class I:  Soil and Rock slope $\leq 21$  Embankment $\leq 18$	Class II:  21< Soil and Rock slope $\leq 63$  18<Embankment $\leq 54$	Class III:  63< Soil and Rock slope $\leq 189$  54<Embankment $\leq 162$	Class IV  189< Soil and Rock slope $\leq 567$  162<Embankment $\leq 486$
<b>Impact on traffic</b>	Normal traffic continues	Tow-way traffic continues with some delay	One lane remains open	All lanes are blocked long detour required
<b>Annual Average Daily Traffic (AADT)</b>	<500	500-4000	4000-10000	>10000
<b>Average Vehicle Risk (AVR)</b>	<25%	25%-50%	50%-75%	>75%
<b>% Decision Sight Distance (DSD)</b>	Adequate (100%)	Moderate (80-99%)	Limited (60-79%)	Very limited (<60%)
<b>Maintenance Response: Frequency or Cost</b>	Once every 5 years or less	Once every 2 to 4 years	1 to 1 times a year	3 times a year or more
	< \$ 2000	\$ 2000-\$5000	\$5000-\$25000	>\$25000

*Darrow et al., 2009*

## RHRON, Ontário

**Tabela D.21 - Sistema de classificação adotado pelo Ontário, Canadá**

TERMINOLOGY (RHRON Ratings and Formulae) P = <u>Parameter</u> , a property characterizing the degree of hazard; V = <u>Value</u> of the parameter, with units of measurement (e.g. lengths in metres); T = <u>Truncated value</u> for a parameter not allowed to exceed the limits of a permissible range; R = <u>Rating</u> derived from values or truncated values, normalized to give a range from 0 (good) to 9 (bad); F = <u>Factor</u> obtained by averaging a group of related ratings.			
PARAMETER	TRUNCATION RANGE & UNITS	DETERMINATION OF VALUE	DETERMINATION OF RATING
<b>P1 Hist</b> History/evidence of falls	R1 [0 - 9]	Rating estimated directly	Estimated from maintenance reports and on-site evidence
<b>P2 Qmax</b> Largest potential fall	T2 [1-10 m3]	In-place volume	$R2 = 9[\log_{10}(T2)]$
<b>P3 Qtot</b> Total quantity of potential rockfall	T3 [1-100 m3]	In-place volume	$R3 = 4.5[\log_{10}(T3)]$
<b>P4 Firr</b> Face irregularity	T4 [0.0 - 2.5 m]	Visual estimate	$R4 = 3.6(T4)$
<b>P5 Loose</b> Face looseness	R5 [0 - 9]	Rating directly estimated	Estimate Rating from Figure 11
<b>P6 Jop</b> Joint orientation/ persistence	R6 [0 - 9]	Rating directly estimated	Estimate Rating from Figure 12
<b>P7 UCS</b> Intact strength	T7 [1-200 MPa]	Estimate Uniaxial Compressive Strength from Figure 13 a)	$R7 = 9 - [3.911 \times \log_{10}(T7)]$
<b>P8 Phip</b> Shear strength Case 1: sliding unlikely ( $R6 < 7$ )	T8 [20° - 70°]	Estimate V8 from Figure 13 c)	$R8 = 12.6 - 0.18(T8)$
<b>Case 2: sliding possible</b> ( $R6 > 7$ ) (no interlocking)	V8 [5° - 25°] T8 [20° - 25°]	$V8 = \phi_b$ based on mineral composition of filling given in Figure 13 b)	$R8 = 9 - 8.5 \log_{10}(\phi_b)$ $\phi_b < 20^\circ \quad 22^\circ \quad 25^\circ$
<b>Case 3: Sliding possible</b> ( $R6 > 7$ ), interlocking rough thinly filled or weathered surfaces)	T8 [20° - 70°] at $\phi_n = 300$ kPa	$V8 = \phi_b + 2JRC / (1+3,000/JCS)$ (kPa units), JRC, JCS, $\phi_b$ from UCS given in Figure 13 a)	$R8 = 12.6 - 0.18(T8)$
<b>P9 Block</b> Block size	T9 [2 cm - 2 m]	$V9 = D_{50}$ median dia.	$R9 = 10.355 - [4.5 \times \log_{10}(T9)]$
<b>P10 Sdur</b> Slake-durability	V10 [0 - 100%] T10 [0 - 80%]	Estimate Slake-durability index $I_{d2}$ from Figure 14. Check by testing (ISRM, 1981) if estimated $V10 < 70\%$	$R10 = 9 - (0.1125 \times T10)$
<b>P11 Wtab</b> Water table height	V11 [0 - 100%]	$V11 = 100h/(V12)$ % height of face	$R11 = 0.09(V11)$
<b>P12 Height</b> Slope height	T12 [0 - 30 m]	Estimate and check by clinometer or photo measurements	$R12 = 0.3(T12)$

TERMINOLOGY (RHRON Ratings and Formulae) P = <u>Parameter</u> , a property characterizing the degree of hazard; V = <u>Value</u> of the parameter, with units of measurement (e.g. lengths in metres); T = <u>Truncated value</u> for a parameter not allowed to exceed the limits of a permissible range; R = <u>Rating</u> derived from values or truncated values, normalized to give a range from 0 (good) to 9 (bad); F = <u>Factor</u> obtained by averaging a group of related ratings.			
PARAMETER	TRUNCATION RANGE & UNITS	DETERMINATION OF VALUE	DETERMINATION OF RATING
P13 Cang Crest angle	T13 [20° - 80°]	See Figure 6	$R13 = 0.15(T13) - 3$
P14 Czw Clear zone width (ditch + shoulder)	V14 [30% - 120%]	V14 = 100 (Czw/Czwd) (%) measure Czw (m) with tape Czwd = f(SADT, Psl) from Figure 15	$R14 = 12 - 0.1(V14)$
P15 Deff Ditch effectiveness	V15 [0 - 100%]	V15 = Probability of any Qmax rock reaching the pavement (%)	$R15 = 0.09(V15)$
P16 Ovsp Overspill potential	V16 [0 - 100%]	Reach of Qmax as % width of pavement	$R16 = 0.09(V16)$
P17 Avr Average vehicle risk	T17 [0 - 100%]	$V17(\%) = (SADT \times \sum L_{haz}) / (240 \times psl)$	$R17 = 0.09(T17)$
P18 Dsd Decision sight distance	T18 [40% - 120%]	$V18 = (SD/DD) \times 100\%$ Psl 50 60 70 80 90 100 km/h DD 141 165 193 226 264 308 m	$R18 = 13.5 - 0.1125(T18)$
P19 Apw Available paved width	T19 [6 - 16 m]	V19 = nearside paved width (m) for a divided highway, otherwise full paved width	$R19 = 14.4 - 0.9(T19)$
P20 Remcost Remediation cost estimate	T20 [\$1,000 - \$1,000,000]	V20 = Costnet x Continge	$R20 = 3\log_{10}(T20) - 9$
F1 Magnitude	F1 (0-9)	Rating only	$F1 = [R2+R3+R12]/3$
F2 Instability	F2 (0-9)	Rating only	Ravelling mode $F2 = [R1+R9+R11+R4+R5+R6]/6$ Sliding mode $F2 = [R1+R9+R11+R5+R6+R8]/6$ Erosion mode $F2 = [R1+R9+R11+R4+R7+R10]/6$
F3 Reach	F3 (0-9)	Rating only	$F3 = [R13+R14+(R15+R16)/2]/3$
F4 Consequences	F4 (0-9)	Rating only	$F4 = [R17+R18+R19]/3$
RHRON Ontario Rock Hazard Rating			$RHRON = (F1+F2+F3+F4)/4$
COSTBEN Cost-benefit Rating			$COSTBEN = 100(R20 / (RHRON \times Remx\%))$

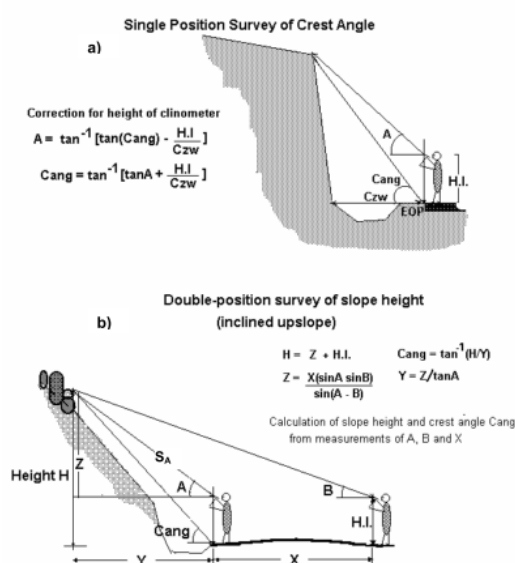
in Franklin et al.,2012



**Tabela D.22 – Formulário para aplicação do sistema de classificação adotado pelo Ontário, Canadá**

Slide volume estimation	<p>Boulder: Cube <math>D^3</math>; Sphere <math>4/3\pi r^3 = 0.523 D^3</math></p> <p>2D wedge: <math>(XYZ/2) \sin(A-B)</math></p> <p>3D pyramid: <math>(XYZ/6) \sin(A-B)</math></p> <p>where: X = crest length; Y = length of upslope dip line, Z = length of face dip line, A = face dip angle; B = upslope dip angle</p>
Shale erosion undercut rates (cm/yr) (Shakoor & Rogers, 1992)	<p>Urate cm/yr = <math>8.66 - 0.1717(S_{dur})</math> if <math>S_{dur} &lt; 30\%</math></p> <p>Urate cm/yr = <math>3.17 - 0.0137(S_{dur})</math> if <math>S_{dur} &gt; 30\%</math></p> <p>Urate cm/yr = <math>2.10 - 0.0119(S_{dur})</math> if <math>S_{dur} &gt; 90\%</math></p>
Barton shear strength criterion as reformulated by Maksimovic (1996)	<p><math>\tau = \sigma_n \tan \phi_p</math></p> <p><math>\phi_p = \phi_b + 2JRC/(1 + 10\sigma_n/JCS)</math></p> <p>where <math>\phi_p</math> = peak friction angle; <math>\phi_{ip} = \phi_p</math> at <math>\sigma_n = 300</math> kPa</p> <p><math>\tau</math> = shear strength of the joint (kPa);</p> <p><math>\sigma_n</math> = component of stress normal to the joint (kPa)</p>
<b>b) Miscellaneous Formulae</b>	

in Franklin et al.,2012



**Figura D.2 – Medição do ângulo de crista do talude**

## RHRSm2

Tabela D.23 - Critérios de classificação utilizados no RHRSm2

	Pontuação			
Critérios	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude	7,5m	7,5 – 22,5m	22,5 – 30m	> 30m
Inclinação do talude	< 30°	30° – 40°	40° – 50°	> 50°
Largura das banquetas	≥ 4m	2 – 3m	≤ 1m	–
Eficácia da vala	Boa retenção	Moderada retenção	Retenção limitada	Retenção muito limitada
Zona de influência	Longe	Média	Perto	Muito perto
Largura da estrada	21,5m	15,5m	9,5m	3,5m
Condição estrutural	Descontinuidades com orientação favorável	Descontinuidades com orientação aleatória	Descontinuidade e com orientação desfavorável	Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável
Grau de meteorização	Pequeno W=1	Moderado W=2–2	Elevado W=3–4	Extremo W=5
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Volume de blocos por evento	2,3m <sup>3</sup>	4,6m <sup>3</sup>	6,9m <sup>3</sup>	9,3m <sup>3</sup>
Quantidade de blocos	Nenhuns	Poucos	Alguns	Muitos
Irregularidade da face	Baixa	Média	Elevada	Muito elevada
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluído
Histórico de queda de blocos	Poucas quedas (1/10 anos)	Quedas ocasionais (3/ano)	Muitas quedas (6/ano)	Quedas constantes (9/ano)
Risco médio para veículos	25%	50%	75%	100%
Distância de visibilidade de decisão	Adequada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muito limitada (40%)
Clima	Baixa precipitação (< 1000mm)	Precipitação moderada (1000–2000mm)	Precipitação elevada (> 2000mm)	–

Tabela D.24 - Fatores, parâmetros, pesos e intervalos de valores

Fatores		Parâmetros		Critérios e pesos				
<b>Geométrico</b>	0,17	<b>Altura talude (m)</b>		< 10	10–20	20–30	30–40	> 40
		0,50		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
		Peso		1	2	3	4	5
		<b>Inclinação talude (°)</b>		< 30	30–40	41–50	51–60	> 60
		0,35		Muito gradual	Gradual	Médio	Inclinado	Muito inclinado
<b>Geológico</b>	0,14	<b>Inclinação da banquetta (°)</b>		Correcta	Incorrecta	–	–	–
		0,15		1–2	4–5	–	–	–
		<b>Largura da banquetta (m)</b>		0–1	1–2	2–3	3–4	> 4
		0,25		1	2	3	4	5
		Peso		1	2	3	4	5
<b>Geológico</b>	0,14	<b>Litologia</b>	<b>Tipo</b>	I	II	III	IV	V
			0.40					
			Peso	1	2	3	4	5
			<b>Grau de meteorização (W)</b>	Sem meteorização (W=1)	Ligeiramente (W=2)	Moderadamente (W=3)	Altamente (W=4)	Decomposto (W=5)
			0.30					
<b>Geológico</b>	0,14	<b>Falhas</b>		Existentes				
			0.30					
			Peso	4–5				
			<b>Blocos</b>	< 51	51–153	153–333	333–459	> 459
			0.20					
<b>Geológico</b>	0,14	<b>RHRSm2</b>		1	2	3	4	5
			1.00					
			Peso	1	2	3	4	5

Tabela D.24 - Fatores, parâmetros, pesos e intervalos de valores (continuação)

Fatores	Parâmetros		Critérios e pesos				
<b>Geológico (cont.)</b>	<b>Sistemas empíricos</b> 0.30  (usar apenas um sistema: Q, RMR ou SMR)	<b>Q</b>	40–1000	10–40	4–10	1–4	0.001–1
		0.33					
		Peso	1	2	3	4	5
		<b>RMR</b>	100–81	80–61	60–41	40–21	20–0
		0.34					
		Peso	1	2	3	4	5
<b>Sistema de drenagem</b> 0,11	<b>Drenagem superficial</b> 0.60	<b>Estado de conservação</b>	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau
		0.35					
		Peso	1	2	3	4	5
		<b>Estado de manutenção</b>	Bom	Médio	Mau	–	–
		0.45					
		Peso	1	2	3	–	–
	<b>Drenagem profunda</b> 0.20	<b>Presença</b>	Sim	Não			
		0.20					
		Peso	1–2	4–5			
	<b>Drenagem de banquetas</b> 0.20	<b>Presença</b>	Sim	Não			
		1.00					
		Peso	1–2	4–5			
<b>Inspecções visuais</b> 0,11	<b>Estado de conservação</b> 0.60	<b>Classificação</b>	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau
		Peso	1	2	3	4	5
	<b>Estado de manutenção</b> 0.40	<b>Classificação</b>	Bom	Médio	Mau		
		Peso	1	2	3		

Tabela D.24 - Fatores, parâmetros, pesos e intervalos de valores (continuação)

Factores		Parâmetros		Critérios e pesos				
<b>Monitorização</b>	0,11	<b>Células de carga</b> 0.25	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
				[0–20%]	[20–40%]	[40–60%]	[60–80%]	[80–100%]
			Peso	1	2	3	4	5
		<b>Inclinómetros</b> 0.25	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
				[0–20%]	[20–40%]	[40–60%]	[60–80%]	[80–100%]
			Peso	1	2	3	4	5
		<b>Piezómetros</b> 0.25	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
				[0–20%]	[20–40%]	[40–60%]	[60–80%]	[80–100%]
			Peso	1	2	3	4	5
		<b>Marcas superficiais</b> 0.25	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
				[0–20%]	[20–40%]	[40–60%]	[60–80%]	[80–100%]
			Peso	1	2	3	4	5
<b>Histórico</b>	0,07	<b>Acidentes no talude</b> 0.70	<b>Queda de Blocos</b> 0.25	Nenhuma	Inactivas	Algumas	Activas	Muito activas
			Peso	1	2	3	4	5
			<b>Rotura planar</b> 0.25	Nenhuma	Inactivas	Algumas	Activas	Muito activas
			Peso	1	2	3	4	5
			<b>Rotura por cunha</b> 0.25	Nenhuma	Inactivas	Algumas	Activas	Muito activas
			Peso	1	2	3	4	5
			<b>Rotura circular</b> 0.25	Nenhuma	Inactivas	Algumas	Activas	Muito activas
			Peso	1	2	3	4	5
		<b>Intervenções</b>		Nível 3	Nível 2	Nível 1		
		0.30						
		Peso		1–2	3	4–5	–	–

Tabela D.24 - Fatores, parâmetros, pesos e intervalos de valores (continuação)

Factores		Parâmetros		Critérios e pesos				
<b>Ambiental/Tráfego</b>	0,08	<b>Zona sísmica</b> 0.30 Peso	<b>Tipo 2</b> 0.60 Peso	2.1 5	2.2 4	2.3 3	2.4 2	2.5 1
			<b>Tipo 1</b> 0.40 Peso	1.1 5	1.2 4	1.3 3	1.4 2	1.5–1.6 1
		<b>Precipitação anual (mm)</b> 0.50 Peso		< 100 1	100–500 2	500–1000 3	1000–2000 4	> 2000 5
				50–60 1	60–70 2	70–90 3	90–100 4	100–120 5
		<b>Tráfego</b> 0.20	<b>Velocidade máxima (km/h)</b> 0.50 Peso	< 1800 1	1800–1900 2	1900–2000 3	2000–2200 4	> 22000 5
			<b>Tráfego médio diário (TMD) (Veículos)</b> 0.50 Peso	< 1800 1	1800–1900 2	1900–2000 3	2000–2200 4	> 22000 5
<b>Protecções</b>	0,10	<b>Protecções superficiais</b> 0.80 Peso		< 25% 5	[25–50%] 4	50% 3	[50–75%] 2	[75–100%] 1
		<b>Coberto vegetal</b> 0.20 Peso		Não existe 5	Pontual 4–3	Uniforme 1–2		
<b>Imediações</b>	0,09	<b>Sobrecargas</b> 0.60 Peso		Sim 5	Não 1			
		<b>Vibrações</b> 0.40 Peso		Sim 5	Não 1			

# **APÊNDICES**





**APÊNDICE I: Ficha de campo para caracterização de acidentes e incidentes em taludes rodovias e ferroviários**

<b><u>Ficha de caracterização de acidentes e incidentes em taludes rodovias e ferroviários</u></b>					
Ficha nº _____					
Data da inspeção: ____/____/____ (dd/mm/ano)					
<b>Localização</b>					
Distrito:			Coordenada_M:		
Concelho:			Coordenada_P:		
Localidade:			Via em estudo:		
<b>Caracterização do perfil da via</b>					
Ponto de observação:		km inicial:		km final:	
Perfil transversal: ____X____			Bermas:		
Perfil de terraplenagem:		Aterro ( )		Escavação ( )	
Misto ( )					
<b>Estruturas adjacentes</b>					
Tipo:		Lado: Esquerdo ( ) Direito ( )			
Função:		Extensão: m		Altura: m	
<b>Caracterização do(s) talude(s)</b>					
Tipo:		Lado: Esquerdo ( ) Direito ( )			
Aterro ( )	Erosão do talude de aterro ou escavação ( )	Assentamentos ou erosão ( )	Movimentos lentos ( )	Movimentos rápidos ou torrente de detritos ( )	
Maciço rochoso ( )	Boa captação de blocos de pequena dimensão ( )	Fraca captação de blocos de menor dimensão ( )	Captação limitada de blocos de grande dimensão ( )	Sem captação de blocos de grande dimensão ( )	
Misto ( )	Percentagem de espessura	Solo: %		Rocha: %	
Irregularidade na face do talude	Suave ( )	Baixa ( )	Moderada ( )	Elevada ( )	Muito elevada ( )
Perda de material da face do talude	Sem perda ( )	Pouca ( )	Moderada ( )	Elevada ( )	Muito elevada ( )
Presença de água no talude	Seco ( )	Húmido ( )	Molhado ( )	Gotejante ( )	Fluxo de água contínuo ( )
Geometria:		Altura: m		Extensão: m	
<b>Ângulo do talude</b>		Ângulo de atrito:		Resistência da rocha intacta:	
Na base:					
Superior à crista:					
Litologia:					
Composição do material:					
Presença de blocos soltos: Sim ( ) Não ( )		Tamanho:		Forma:	
				Quantidade:	

Caracterização litológica dos blocos:				
Presença de camadas: Sim ( ) Não ( )				
Diaclasamento: Sim ( ) Não ( )			Atitude do diaclasamento:	
Preenchimento: Sim ( ) Não ( )			Tipo de preenchimento:	
Descontinuidades: Sim ( ) Não ( )			Abertura em cm:	
Apresenta meteorização: Sim ( ) Não ( )	W1 ( )	W2 ( )	W3 ( )	W4 ( ) W5 ( )
Apresenta fracturação: Sim ( ) Não ( )	F1 ( )	F2 ( )	F3 ( )	F4 ( ) F5 ( )
Comprimento da valeta (no troço afetado): m	Volume da valeta: m <sup>3</sup>		Forma da valeta:	
Eficácia da vala	Boa captação ( )	Captação moderada ( )	Captação limitada ( )	Sem captação ( )
<b>Observações:</b>				
<b>Esquema / Esboço</b>				
<b>Drenagem</b>				
Via: Sim ( ) Não ( )			Tipo:	
Taludes: Sim ( ) Não ( )			Tipo:	
Estruturas adjacentes: Sim ( ) Não ( )			Tipo:	
<b>Caracterização da via</b>				
Via: Ascendente ( ) Descendente ( )			Largura da via:	
Nº de vias:				
Comprimento do troço afetado				
Possibilidade de desvio dos blocos tombados na via? Sim ( ) Não ( )				
Distância de visibilidade decisão	Adequada ( )	Moderada ( )	Limitada ( )	Muito limitada ( )
Impedância da via	Berma ( )	½ da via ( )	¾ da via ( )	Toda a via ( )
Danos nos carris	Sim ( ) Não ( )	Gravidade da situação		
Estruturas danificadas	Não ( )	Sim ( )	Tipo:	
Impacto da rotura na via	< 15m ( )	15– 60m ( )	60 – 150m ( )	>150 m
Tráfego médio diário	<500 ( )	500 – 2750 ( )	2751 – 5000 ( )	>5000 ( )
<b>Historial de movimentos de massa</b>				
Primeira ocorrência: Sim ( ) Não ( )		Data:		
	Sim ( )	Não ( )	Observações	
Obrigou ao encerramento de alguma via?				
Foram realizadas medidas de intervenção?				
Houve evolução do problema?				
Existe algum plano de reabilitação?				
Recolha fotográfica: Sim ( ) Não ( )		Se sim, número de fotografias:		
<b>Monitorização / Caracterização</b>				
Situação:	Ativa ( )	Não ativa ( )	Ano início/fim:	

Deformações registadas:      Superficiais ( ) Profundas ( )		Tipo/nº instrumentos Localização:	
		Tipo/nº instrumentos Localização:	
Outros: Piezómetros: ( )	Tipo/n.º	Localização:	
Células de carga ( )	Tipo/n.º	Localização:	
<b>Observações:</b>			
<b>Esquema/Esboço</b>			
<b>Registo da ocorrência / Descrição da instabilidade</b>			
Tipo de materiais envolvidos:			
Existência de água?: Sim ( ) Não ( )		Cicatrizes antigas?: Sim ( ) Não ( )	
Queda de blocos?: Sim ( ) Não ( )		Ravinamento?: Sim ( ) Não ( )	
Deslizamento de terrenos?: Sim ( ) Não ( )		Acontecimentos pontuais?: Sim ( ) Não ( )	
Ocupou a via?: Sim ( ) Não ( )		Se sim, quantas vias:	
Afetou sistemas de drenagem? Sim ( ) Não ( )		Se sim, que tipo:	
Deu-se um aumento da inclinação?: Sim ( ) Não ( )		Erosão superficial?: Sim ( ) Não ( )	
Condições climatéricas anormais?: Sim ( ) Não ( )		Erosão interna?: Sim ( ) Não ( )	
Variação brusca da temperatura?: Sim ( ) Não ( )		Acidentes naturais?: Sim ( ) Não ( ) Quais?	
<b>Observações:</b>			
<b>Aparente situação de risco</b>			
Risco 1 - baixo ( )	Risco 2 - médio ( )	Risco 3 - alto ( )	Risco 4 - muito alto ( )



**APÊNDICE II: Caracterização dos taludes de escavação do trecho  
Guarda-Vilar Formoso**

**Tabela II.a - Características geológicas e geotécnicas dos taludes no trecho  
Guarda-Vilar Formoso**

Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das descontinuidades
0+000	370	LE	5,40	N65°-70°W	85°S	<b>F1:</b> N70°-85°W80-90°N <b>F2:</b> N30°E88°S <b>F3:</b> 110°E,12°S
0+100	70	-	-	N65°-70°W	85°S	-
0+895	140	LE	<5,00	N86ºW	Sub-vertical	<b>F1:</b> NW-SE: vertical paralela ao talude <b>F2:</b> NE-SW: oblíqua a inclinar para E <b>F3:</b> Família sub-horizontal
		LD	>2,50			
1+220	115	-	<8,00	N83ºW		-
1+520	-	LE	1,60	N59ºE		-
1+670	-	LE	1,00			-
1+710	335	-	<4,00			-
1+720	160	-	<4,00			-
1+750	70	-	<4,00			<b>F1:</b> Sub-vertical NE inclina N <b>F2:</b> Sub vertical NW inclina W <b>F3:</b> Sub-horizontal inclina para S
2+620	100	-	<3,00	N82ºW		-
2+720	200	-	5,00			-
2+940	50	-	7,50			-
3+070	150	-	2,00			-
3+520	100	-	7,50	N63,5ºE		<b>F1:</b> NW-SE70ºE <b>F2:</b> NE-SW75ºW <b>F3:</b> Sub-horizontal inclina 10ºS
3+620	50	-	2,50			-
4+220	80	LE	2,50	N80ºE		-
4+360	-	-	1,70			-
4+400	-	-	2,00			LD: <b>F1:</b> NE-SW inclina W LE: <b>F1:</b> E-W; sub-horizontal: 20ºE
4+475	-	-	-			-

Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das descontinuidades
4+480	-	-	2,00			F1: NW,SE 80º-90ºE F2: Sub-horizontal 10ºS
4+560	100	LE e LD	4,50			-
4+660	100	LE	2,50			F1:WE,80ºN F2: Sub-horizontal 15ºE e W (roda) F3: NE-SW
5+135	125	-	LD: 1,80 LE: 2,00	N67ºE		LD: F1: NWW a SE-E
5+290	-		7,80			-
5+560	80	-	-	N81,5ºE		-
5+640	20		6,00			F1: WSW a ESW inclina N80º
5+660	100	LD	2,80			-
5+760	130	LD	-	N65ºW		90º
5+760	130	LE	-	N35ºE	54ºN	F1: NWSE
5+890	70	LD e LE	2,50	N81,5ºE	Sub-vertical	F1: EW sub-vertical F2: NE-SW sub-vertical F3: Sub-horizontal F4: NS inclina 70ºE
6+360	50	-	3,00			F1: NW-SE inclina para E F2: EW, vertical, inclina para W F3: Sub-horizontal
6+980	30	LD	1,40	N83,5ºW		-
7+160	200	LE e LD	1,80	N72ºW		LD: F1: Sub-horizontal E-W F2: NE-SW sub-vertical
7+360	50	-	1,20			-
7+410	60	LE	3,50			F1: E-W sub-vertical F2: Sub-vertical, inclina para W
7+470	440	-	3,50			-
7+910	140	LD	2,80			-
7+910	140	LE	1,90			F1: NE-SW/ NW-SE
8+060	-	LD	4,00			F1: NW-SE F2: NE-SW F3: Sub-horizontal W20º
8+060	-	- LE	3,00			-
8+115	-	-	-			Falhas NE-SW
8+130	-	-	4,50			-
8+160	20	LE e LD	<5,00			-
8+590	70	LE	3,20	N55ºE		F1: N40º-60ºW80ºW F2: E-W, 75ºS a N20ºE F3: N20ºE, 10ºN
8+590	70	LD	4,00			

Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das descontinuidades
8+660	100	-	<5,00			-
9+160	120	LE	4,50			<b>F1:</b> 30°-50°W, N40°-60°E <b>F2:</b> N25°E,40°N <b>F3:</b> N70°W,75°N (Pouco extensa)
9+160	120	LD	11,00			
9+820	132	-	3,00	N53°E	Sub-vertical	<b>F1:</b> E-W sub-vertical (paralela à linha) <b>F2:</b> NE-SW <b>F3:</b> Sub-horizontal inclina p/ W
9+990	55	LD	4,00			
10+100	60	LE	1,65			-
10+100	60	-	3,00			-
10+360	100	-	1,20			<b>F1:</b> E-W sub-horizontaal inclina 15°w
10+560	80	LE	3,00			<b>F1:</b> N40°E.80°N <b>F2:</b> N60°W88°N <b>F3:</b> N55°E, 88°W
10+830	90	LD	5,50	N76,5°E		-
10+830	90	LE	4,00			<b>F1:</b> NE-SW inclina p W - sub-vertical <b>F2:</b> Sub-horizontal inclina para E
11+060	40	-	4,00			-
11+140	120	LE	5,00	N53°E		<b>F1:</b> NE-SW,80°SE (extensa) <b>F2:</b> NW-SW.85°SW (extensa) <b>F3:</b> Sub-vertical inclina 15°N
11+140	120	LD	6,50			-
11+260	40	LD	8,00			-
11+490	170	LE e LD	3,00/ 4,50			-
11+680	60	LD e LE	7,50/4,00			-
11+850	100	LE	7,50			<b>F1:</b> NE-SW com oxidos de ferro
11+850	100	LD	8,50	N75°W		<b>F1:</b> NW-SE
11+966	54	-	>8,00			<b>F1:</b> N70°-90°E,60°- 80°SE <b>F2:</b> N45° - 50°W 90°S
12+020	50	-	8,00			-
12+270	50	LE	6,00			-
12+270	50	LD	6,50			-

Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das discontinuidades
12+660	100	LE	3,00	N46,5ºW	Sub-vertical	<b>F1:</b> N30ºE,84ºN <b>F2:</b> N50ºW,88ºE <b>F3:</b> Sub-horizontal - 20ºW
12+660	100	LD	4,00			-
12+760	100	LE	-			-
12+760	100	LD	7,50			<b>F1:</b> N30ºE <b>F2:</b> N60ºW
12+860	70	LE	7,00			-
13+090	70	LD	7,00			-
13+090	70	LE	8,50			-
13+160	210	LE	8,00	N82ºW		-
		LD	9,00			<b>F1:</b> E-W - rotura em cunha (extensão de 4m)
13+530	140	LD	6,00			-
13+530	140	LE	4,50			<b>F1:</b> NE,80ºN <b>F2:</b> NW, 80ºS <b>F3:</b> Sub-horizontal inclina 20ºW
13+710	120	LE	8,50	N59ºE		<b>F1:</b> N60º-65ºW80-88ºS <b>F2:</b> N15-25ºW82-86ºW <b>F3:</b> Sub-horizontal inclina 10ºE
13+810	70	-	8,00			-
13+880	50		2,50/ 3,00	N51ºE	Sub-vertical	-
13+930	230	LE	2,50			-
14+390	155	-	9,50			<b>F1:</b> N40ºE75ºS <b>F2:</b> N60ºW82ºW
14+560	190	LE	4,50			-
14+560	190	LD	5,00			<b>F1:</b> Sub-vertical NE-SW e NW-SE 8 extensão > 2m. Caixa de falha ao PK: 231+ 240m com atitude E-W - Húmida
14+960	85	LD	6,00			-
14+975	70	LE	4,00			<b>F1:</b> N80ºW85ºW
15+150	150	LD	14,00			<b>F1:</b> Fraturas N/S- silto-argiloso (4cm de espessura) <b>F2:</b> N15ºW65ºE <b>F3:</b> N20ºE 82ºW
15+150	150	LE	5,00			-
15+470	30	-	2,20			-



Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das descontinuidades
15+650	120	LD	13,00			F1: N80ºW85ºN F2: N50ºE sub-vertical inclina para sul
15+650	120	LE	11,00			-
16+110	90	LD	10,00			F1: NW-SE80ºE
16+110	90	LE	-			-
16+340	120	LD	9,50			-
16+340	120	LE	9,50			F1: NE
16+740	420	LD	12,00			F1: EW F2: NS
16+740	420	LE	9,50			F1: N35ºE78ºS
17+240	50	LD	9,50			-
17+240	50	LE	7,00			-
17+400	60	LE	1,20	N18ºE	-	
17+400	68	LD	2,50		-	
17+760	115	LE	8,50	N72ºW		F1: Sub-vertical com >1,60 m de continuidade
17+960	85	LD	7,50			-
17+960	85	LE	4,50		Sub-vertical	-
18+080	25	LD	-			-

Pk	Extensão (m)	Lado (em relação à linha)	Altura máx. talude (m)	Direção do talude	Inclinação do talude	Orientação das descontinuidades
18+320	360	LD	3,00	N80°E		<b>F1:</b> NE-SW (pouco abertas) <b>F2:</b> Fraturas sub-horizontais abertas
18+320	360	LE	2,00			
18+760	200	-	<8,00	N48,5°E		<b>F1:</b> 20°NW
18+970	310	LD	7,30			-
18+970	310	LE	<1,80			-
19+680	210	LE	2,50	N19°E		<b>F1:</b> N-S sub-vertical <b>F2:</b> N40°W sub-vertical
20+155	95	LD	7,80			<b>F1:</b> NNE-SSW inclina para W
20+155	95	-	4,50	N44°E		Fraturas sub-horizontais abertas
20+360	100	LD	6,50			-
20+480	450	LD	2,50			-
		LE	7,00			-
20+960	300	LE	12			-
20+960	300	LD	7,50			-
21+460	200		7,00	N77°E		-
21+560	200	LE	4,00			-
22+040	60	-	4,00	N78°E		-
23+330	80	LD	13,00	N42°E	Falhas sub-horizontais erodíveis	
23+330	80	LE	8,00		Sub-vertical	-
23+450	60	LD	<15,00			-
		LE	3,00			

**Tabela II.b - Caracterização geotécnica do talude e das valas de captação**

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
0+000	W <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	-	-	-
0+100	W <sub>5</sub>	-	2m		-
0+895	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	-	LD: 1,80 LE: 2,20		-
		F <sub>3</sub>	LD: 2,00 LE: 1,50		30x30x30
1+220	W <sub>2</sub>	-	> 2,00		-
1+520	-	-	2,00		-
1+670	-	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	LD: 2,00 LE: 1,50		-
1+710	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	-	2,00		-
1+720	-	F <sub>2</sub> com zonas F <sub>1</sub>	2,00		-
1+750	-	-	-		-
2+620	W <sub>1-2</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	1,80		
2+720	W <sub>4-5</sub>	-	-	-	-
2+940	W <sub>3</sub>	-	0,8	1,2	-
3+070	W <sub>1-2</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	-	-	-
3+520	W <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	0,50	2,00	-
3+620	-	-	2,50		-
4+220	W <sub>4</sub>	-	0,6	-	-
4+360	W <sub>2</sub>	-	LE: 1,00		-
4+400	-	-	-	-	-
4+475	W <sub>4</sub>	-	1,00	1,50	--
4+480	W <sub>3</sub> passa a W <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	0,60	1,20	

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
4+560	W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> com zonas F <sub>2</sub>	-	1,40	-
4+660	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	0,8	-	-
5+135	W <sub>3</sub>	-	-	-	-
5+290	-	-	-	-	-
5+560	W <sub>2</sub> /W <sub>2</sub>	F <sub>1</sub> a F <sub>2</sub>	-	-	-
5+640			-	-	-
5+660	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>2</sub>	-	-	-	-
5+760	W <sub>1-2</sub>	-	-	-	-
5+760	W <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	LD: 1,70 LE: 2,20		110x50x80
5+890	-	-	-	-	-
6+360	W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> /F <sub>4</sub>	0,7	1,80	-
6+980	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	0,2	1,2	-
7+160	W <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	-	-	-
7+360	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4-5</sub>	-	0,4	1,2	-
7+410	W <sub>3</sub>	F <sub>1-2</sub>	1,00	1,00	60x20x20
7+470	W <sub>3</sub>	-	0,80	2,00	-
7+910	-	-	-		-
7+910	-	-	-	-	-
8+060	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>2</sub>	-	1,00	1,20	110x30x35 80x40x40
8+060	W <sub>3</sub> /W <sub>4</sub>	-	0,50	-	34x44x55
8+115	W <sub>4-5</sub>	-	1,20	1,10	-
8+130	W <sub>4</sub>	-	-	-	-
8+160	-	-	0,8	1,1	-
8+590	-	-	1,0	1,0	-
8+590	-	-	-	-	-
8+660	-	-	0,6	1,1	-
9+160	-	-			-

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
9+160	W <sub>3</sub> /W <sub>4</sub>	-	0,6	1,1	-
9+820	W <sub>3</sub> / W <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	1,2	1,1	-
9+990	-	-	0,9	1,1	-
10+100	-	-	1,2	1,2	-
10+100	W <sub>4</sub>	-	0,9	1,2	-
10+360	-	-	0,8	1,2	-
10+560	W <sub>3</sub> /W <sub>4</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	1,0	0,9	-
10+830	W <sub>3</sub> /W <sub>4</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	-	-	1,0x0,6x0,9 (talude) 0,85x0,5x0,5 (vala)
10+830	W <sub>5</sub>	-	-	-	-
11+060	W <sub>3</sub>	-	1,1	1,5	-
11+140		-	0,65	1,1	0,70x0,20x0,40
11+140	-	F <sub>2</sub> com zonas F <sub>3</sub>	0,5	1,2	-
11+260	W <sub>3</sub> com W <sub>4</sub> entre fraturas	F <sub>3</sub> com aberturas de 20 cm	0,9	1,1	0,90x0,25x0,20 (LE)
11+490	-	-	-	-	-
11+680	W <sub>4-5</sub>		0,5	0,7	-
11+850		F <sub>3</sub>	0,8	1,00	-
11+850		F <sub>1</sub> (LE) F <sub>2</sub> (LD)	1,0	1,2	-
11+966	-	-	0,8 com blocos caídos	-	-
12+020	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4</sub> entre fraturas	F <sub>3</sub>	1,2	1,2	0,80x0,60x0,25 0,75x0,35x0,25
12+270	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4</sub> entre fraturas	F <sub>3</sub> e F <sub>2</sub> na parte final	0,7	1,0	-
12+270	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> com zonas F <sub>2</sub>	0,6	0,5	-
12+660			0,8	1,2	-
12+660	-	-	-	-	0,45X0,40X0,20

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
12+760	-	-	0,2	0,2	
12+760		F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	-	-	-
12+860	Inicia com W <sub>4</sub> e passa a W <sub>2</sub>	-	0,7	1,2	0,60x0,20x0,25
13+090	W <sub>3</sub>	-	0,6	1,00	
13+090	W <sub>2</sub> e W <sub>4</sub> em zonas recuadas	F <sub>3</sub> com grande extensão >3,5m	-	-	-
13+160	-	-	0,6	1,00	0,60x0,20x0,30
	-	-	1,00	1,00	0,40x0,35x0,30
13+530	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>2</sub>	-	0,4	1,00	0,60x0,4x0,20
13+530	-	Cunhas F <sub>2</sub> a F <sub>3</sub>	0,50	1,00	-
13+710	W <sub>4</sub>	-	0,8	0,9	-
13+810	-	-	0,3	1,1	-
13+880	-	F <sub>2</sub> com zonas F <sub>3</sub>	0,3	1,2	-
13+930	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> com zonas F <sub>2</sub>	0,5	1,00	0,70x0,50x0,10
14+390	W <sub>4</sub> na parte inicial	-	0,6	1,00	1,0x1,0x0,5
14+560	W <sub>4</sub>	-	0,8	1,00	0,50x0,15x0,20
14+560	W <sub>3</sub>	-	0,5	1,00	-
14+960	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	0,8	1,00	0,27x0,23x0,18
14+975	W <sub>4</sub>		0,8	1,00	-
15+150	W <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>3</sub>	-	-	-
15+150	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	>>3,00		-
15+470	-	-	0,8	1,1	-
15+650	-	-	>>3,00		-

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
15+650	-	-	0,5	0,8	-
16+110	W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> com zonas F <sub>2</sub>	» 3,00		-
16+110			0,3	0,9	-
16+340	W <sub>2</sub> com zonas W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	0,4	0,7	-
16+340	W <sub>2</sub> / W <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	0,8	1,1	-
16+740	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4</sub>	F <sub>2</sub> com zonas F <sub>3</sub>	0,40	0,90	-
16+740	W <sub>4</sub> com zonas W <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> / F <sub>3</sub>	0,80	1,10	-
17+240		-	0,40	1,2	-
17+240	W <sub>2</sub> com zonas W <sub>3</sub>	-	0,2	1,0	-
17+400	W <sub>4</sub> no topo, e W <sub>3</sub> /W <sub>2</sub> na base	-	0,7	1,1	-
17+400	-	-	0,5	1,0	-
17+760	-	-	0,6	1,2	-
17+960	-	-	0,3	1,2	0,30x0,40x0,30
17+960	-	-	>2,00		0,30x0,20x0,35 0,30x0,40x0,20 0,40x0,50x0,40
18+080	-	-	0,8	1,0	-
18+320	-	F <sub>4-5</sub>	1,2	-	0,30x0,40x0,15 0,60x0,60x0,40
18+320	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>4</sub>	-	-	-	-

Pk	Grau de alteração	Grau de fracturação	Distância de captação min. (m)	Distância min. á travessa (m)	Descrição dos blocos (cm)
18+760	W <sub>4</sub>	-	0,9	1,1	-
18+970	W <sub>3</sub> com zonas W <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	-	-	0,50x0,45x0,20
18+970	-	-	0,4	1,00	-
19+680	W <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	» 2,00		-
20+155	-	F <sub>3</sub> com zonas F <sub>4</sub>	-	-	0,70x0,55x0,25
20+155	-	-	-	-	-
20+360	-	-	0,8	1,20	-
20+480	-	-	0,6	1,1	-
	W <sub>4-5</sub>	-	0,9	1,1	-
20+960	W <sub>4-5</sub> com zonas W <sub>3</sub>	-	-	-	0,60X0,40X0,30
20+960	-	-	-	-	-
21+460	W <sub>2</sub> /W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> /F <sub>2</sub>	0,50	0,90	
21+560	W <sub>3</sub>	F <sub>3</sub> /F <sub>2</sub>	0,35	1,2	0,30x0,40x0,20
22+040	W <sub>4</sub> /W <sub>3</sub> (Topo)	-	-	-	-
23+330					
23+330					
23+450					

LD – Lado direito; LE – Lado esquerdo



**Tabela II.c - Síntese dos parâmetros utilizados no cálculo do RMR<sub>básico</sub> e SMR**

Pk	USMS	RCU [MPa]	RQD [%]				RMR <sub>básico</sub>	Classe	SMR						
			Máx.	Min.	Médio	Descrição			Família de fraturas	F1 Peso	F2 Peso	F3 Peso	F4 Peso	SMR	Classe
1+710	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2+940	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3+520	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4+400	402	166	100	98	99	Rocha excelente	75	II	1	0.7	0.4	-60	8	66	II
4+475	231	-	-	-	-	-	-	-	2	0.7	1	-60	8	41	III
5+760	207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7+470	387	166	98	77	88	Rocha boa	79	II	1	0.4	1	-60	8	63	II
8+115	207	-	-	-	-	-	-	-	2	0.15	1	-50	8	80	II
8+130	210	-	-	-	-	-	-	-	3	1	0.85	-60	8	36	IV
8+160	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8+590	201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8+590	207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8+660	207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13+760	207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12+760	441	250	100		100	Rocha excelente	80	II	1	0.15	1	-50	8	81	I
12+860	213	-	-	-	-	-	-	-	2	0.85	1	-50	8	46	III
14+460	231	-	-	-	-	-	-	-	3	0.15	0.15	-60	8	87	I
15+150	465	100	98	94	96	Rocha excelente	80	II	1	1	1	-25	8	63	II
15+650	237	-	-	-	-	-	-	-	2	0.15	1	-60	8	79	II
15+650	459	100	-	98	99	Rocha excelente	77	II	3	0.4	1	-6	8	86	
16+110	213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16+110	465	250	100	98	99	Rocha excelente	73	II	1	0.15	1	-25	8	77	II
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	80	II	2	0.15	0.4	-60	8	77	II
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	74	II	3	0.85	1	-50	8	39	IV
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	80	II	1	0.15	1	-25	8	84	I
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	80	II	2	0.15	0.4	-60	8	84	I
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	80	II	3	0.85	1	-50	8	46	III
16+340	465	250	100		100	Rocha excelente	74	II	1	0.15	1	-25	8	78	II

**Tabela II.c - Síntese dos parâmetros utilizados no cálculo do RMR<sub>básico</sub> e SMR**  
(continuação)

										SMR						
										F1	F2	F3	F4			
Pk	USMS	RCU [MPa]	Máx.	Min.	Médio	Classe	RMRbásico	Classe	Família de fraturas	Peso	Peso	Peso	Peso	SMR	Classe	
16+740	429	166	100	96	98	Rocha excelente	74	II	1	0.15	1	-25	8	78	II	
									2	0.4	1	-50	8	62	II	
16+740	255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17+240	225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17+240	249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17+400	483	166	100		100	Rocha excelente	82	I	1	0.15	0.15	-60	8	89	I	
									2	0.15	1	-60	8	81	I	
17+400	483	166	100		100	Rocha excelente	82	I	1	0.15	0.15	-60	8	89	I	
									2	0.15	1	-60	8	81	I	
17+760	273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17+960	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17+960	231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18+080	459	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18+760	249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18+840		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19+680	459		98	96	97	Rocha excelente	74	II	1	0.85	1	-25	8	61	II	
									2	0.15	1	-50	8	75	II	
20+155	459	166	100	95	98	Rocha excelente	79	II	1	0.15	1	-60	8	78	II	
									2	1	1	-60	8	27	IV	
									3	0.15	1	-25	8	83	I	
20+155	459								1	0.15	1	-50	8	80	II	
									2	1	1	-50	8	37	IV	
20+360	459	166	100	90	95	Rocha excelente	79	II	1	0.15	1	-25	8	83	I	
20+480									2	0.15	1	-25	8	83	I	
20+960																
20+960																
22+040		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23+330	459	250	100		100	Rocha excelente	79	II	1	0.4	0.15	-60	8	83	I	
23+330	405	250							2	0.15	1	-6	8	86	I	
23+450	459	250							3	1	1	-6	8	81	I	

Taludes sem risco
  Taludes em risco
  Taludes reabilitados